

## Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea del CRAI-Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la CRAI-Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

**Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-Biblioteca  
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA**

**EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL ÍNDICE DE RIESGO DE LA CALIDAD  
DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN BUCARAMANGA, FLORIDABLANCA  
Y GIRÓN**

**LEIDY JUDITH GONZÁLEZ BARAJAS  
NÉSTOR MAURICIO SARMIENTO DELGADO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS AMBIENTALES  
BUCARAMANGA**

**2017**

EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

**EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL ÍNDICE DE RIESGO DE LA CALIDAD  
DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN BUCARAMANGA,  
FLORIDABLANCA Y GIRÓN**

**LEIDY JUDITH GONZÁLEZ BARAJAS  
NÉSTOR MAURICIO SARMIENTO DELGADO**

Trabajo de grado para optar el título Magister en Ciencias y Tecnologías Ambientales

Director del Proyecto

**MAURICIO ANDRÉS RUIZ OCHOA**

Ingeniero Ambiental

Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Doctor en Ingeniería

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS AMBIENTALES  
BUCARAMANGA**

**2017**

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>7</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>8</b>
<b>Resumen</b>	<b>11</b>
<b>Abstract</b>	<b>12</b>
<b>Introducción</b>	<b>13</b>
<b>1. Planteamiento del Problema</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Definición del Problema</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Justificación</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Objetivos</b>	<b>17</b>
1.3.1 General	17
1.3.2 Específicos	17
<b>2. Marco Referencial</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Marco Teórico</b>	<b>18</b>
2.1.1 Calidad del Agua	18
2.1.2 Índices de Calidad de Agua (ICA)	18
2.1.3 IRCA	19
2.1.3.1 Cálculo del IRCA	20
2.1.3.2 Parámetros del IRCA	23
2.1.3.2.1 Parámetros Físicos	23
2.1.3.2.2 Parámetros Químicos	23
2.1.3.3.3 Parámetros Biológicos	26
2.1.4 Quimiometría	27
2.1.4.1 Análisis de Componentes Principales (PCA)	27
2.1.4.2 Análisis de Varianza (ANOVA)	28
2.1.4.3 Análisis Clúster	28
2.1.4.4 Medidas de Tendencia Central	28
2.1.4.4.1 Media Aritmética	28
2.1.4.4.2 Moda	29
2.1.4.4.3 Mediana	29

# EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

2.1.4.5 Medidas de Dispersión	29
2.1.4.5.1 Desviación Media	29
2.1.4.5.2 Varianza	30
2.1.4.5.3 Desviación Estándar	30
2.1.4.5.4 Coeficiente de Variación	30
2.1.5 Clima y Variabilidad Climática	31
2.1.5.1 Clima	31
2.1.5.2 Variabilidad Climática	31
2.1.5.2.1 Escalas de Variabilidad Climática	32
2.1.5.2.2. Variabilidad Climática en Colombia	33
2.1.5.3 Índices Climáticos	34
2.1.5.3.1 Índice Oceánico de El Niño (ONI)	34
2.1.6 Generalidades de la Zona de Estudio	35
2.1.6.1 Bucaramanga	35
2.1.6.2 Floridablanca	36
2.1.6.3 Girón	36
<b>2.2 Marco Legal</b>	<b>37</b>
<b>3. Método</b>	<b>38</b>
<b>3.1 Tipo de Estudio</b>	<b>38</b>
<b>3.2 Población y Muestra</b>	<b>39</b>
<b>3.3 Fuente de Información</b>	<b>39</b>
3.1.1 Datos de los Parámetros del IRCA	40
3.1.2 Datos de las Variables Macroclimáticas	40
<b>3.4 Metodología</b>	<b>40</b>
3.4.1 Cuantificación de los Parámetro (s) del IRCA que Genera (n) Mayor Impacto en el Cálculo del IRCA	40
3.4.2 Análisis de los Datos Históricos	41
3.4.3 Análisis de la Variabilidad Climática Estacional e Interanual	41
<b>4. Resultados</b>	<b>42</b>
<b>4.1 Cuantificación de los Parámetro (s) del IRCA que Genera (n) Mayor Impacto en el Cálculo del IRCA</b>	<b>42</b>
<b>4.2 Análisis de los Datos Históricos</b>	<b>48</b>
4.2.1 Cloro Residual	48
4.2.2 Turbiedad	49

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

4.2.3 Color Aparente	50
4.2.4 pH	52
4.2.5 Alcalinidad	53
4.2.6 Dureza	55
4.2.7 Cloruros	57
4.2.8 Sulfatos	57
4.2.9 Nitratos	59
4.2.10 Aluminio	61
<b>4.3 Incidencia de la Variabilidad Climática Estacional e Interanual en el Cálculo del IRCA</b>	<b>62</b>
4.3.1 Variabilidad Climática Estacional	62
4.3.2 Variabilidad Climática Interanual	69
<b>4.4 Modelo Matemático Propuesto para el Cálculo del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano en Bucaramanga, Floridablanca y Girón</b>	<b>71</b>
<b>5. Discusión</b>	<b>75</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>83</b>
<b>7. Recomendaciones</b>	<b>85</b>
<b>8. Referencias</b>	<b>86</b>

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1: <i>Valores permisibles de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para la calidad del agua de consumo humano.</i>	19
Tabla 2: <i>Puntaje de riesgo asignado a cada característica para el cálculo del IRCA.</i>	21
Tabla 3: <i>Clasificación del nivel de riesgo en salud según el IRCA y acciones que deben adelantarse.</i>	22
Tabla 4: <i>Normatividad del agua para consumo humano.</i>	38
Tabla 5: <i>Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos a estudiar.</i>	39
Tabla 6: <i>ANOVAs de un factor (zona de procedencia) en función de parámetros fisicoquímicos usados en el cálculo del IRCA.</i>	42
Tabla 7: <i>Diagrama de cuadros HSD Tukey (contraste a posteriori de las medias) de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos usados en el cálculo del IRCA en función de la zona de procedencia.</i>	44
Tabla 8: <i>Matriz de componente rotado de los parámetros fisicoquímicos usados en el cálculo del IRCA.</i>	45
Tabla 9: <i>Clasificación de los coeficientes de correlación de Pearson.</i>	69
Tabla 10: <i>Correlaciones de los parámetros fisicoquímicos usados en el cálculo del IRCA y del IRCA en sí mismo con el Índice Oceánico del Niño (ONI) medido (mensualmente) en los años 2008 al 2015.</i>	70
Tabla 11: <i>Nomenclatura y ecuación asignada a cada parámetro para el cálculo del IRCA</i>	72
Tabla 12: <i>Comparación entre los valores de riesgo asignados según la Resolución No. 2115 de 2007 y el valor de riesgo calculado con el modelo matemático propuesto para cada parámetro en el cálculo del IRCA</i>	73

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1: Dendograma que utiliza un enlace promedio (entre grupos conformados por los parámetros fisicoquímicos usados en el cálculo del IRCA).</i>	47
<i>Figura 2: Diagramas de caja-bigotes anuales del Cloro Residual (mg/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.</i>	49
<i>Figura 3: Serie de tiempo del cloro residual (mg/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.</i>	49
<i>Figura 4: Diagramas de caja-bigotes anuales de la turbiedad (UNT) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.</i>	50
<i>Figura 5: Serie de tiempo de la turbiedad (UNT) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.</i>	51
<i>Figura 6: Diagramas de caja-bigotes anuales del color aparente (UPC) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.</i>	51
<i>Figura 7: Serie de tiempo del color aparente (UPC) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.</i>	52
<i>Figura 8: Diagramas de caja-bigotes anuales del pH (Unidades pH) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.</i>	53
<i>Figura 9: Serie de tiempo del pH (Unidades pH) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.</i>	53
<i>Figura 10: Diagramas de caja-bigotes anuales de la alcalinidad (mg CaCO<sub>3</sub>/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.</i>	54
<i>Figura 11: Serie de tiempo de la alcalinidad (mg CaCO<sub>3</sub>/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.</i>	55
<i>Figura 12: Diagramas de caja-bigotes anuales de la dureza (mg CaCO<sub>3</sub>/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.</i>	56

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

- Figura 13: Serie de tiempo de la dureza (mg CaCO<sub>3</sub>/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.* 56
- Figura 14: Diagramas de caja-bigotes anuales de los cloruros (mg Cl/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.* 57
- Figura 15: Serie de tiempo de los cloruros (mg Cl/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.* 58
- Figura 16: Diagramas de caja-bigotes anuales de los sulfatos (mg SO<sub>4</sub>/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.* 58
- Figura 17: Serie de tiempo de los sulfatos (mg SO<sub>4</sub>/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.* 59
- Figura 18: Diagramas de caja-bigotes anuales de los nitratos (mg/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.* 60
- Figura 19: Serie de tiempo de los nitratos (mg/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.* 60
- Figura 20: Diagramas de caja-bigotes anuales de la concentración de aluminio (mg Al/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.* 61
- Figura 21: Serie de tiempo de la concentración de aluminio (mg Al/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.* 62
- Figura 22: Variabilidad climática estacional del cloro residual en las diferentes zonas de estudio.* 63
- Figura 23: Variabilidad climática estacional de la turbiedad en las diferentes zonas de estudio.* 64
- Figura 24: Variabilidad climática estacional del color aparente en las diferentes zonas de estudio.* 64
- Figura 25: Variabilidad climática estacional del pH en las diferentes zonas de estudio.* 65

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

*Figura 26: Variabilidad climática estacional de la alcalinidad en las diferentes zonas de estudio.* 65

*Figura 27: Variabilidad climática estacional de la dureza en las diferentes zonas de estudio.* 66

*Figura 28 Variabilidad climática estacional del aluminio en las diferentes zonas de estudio.* 66

*Figura 29: Variabilidad climática estacional de cloruros en las diferentes zonas de estudio.* 67

*Figura 30: Variabilidad climática estacional de sulfatos en las diferentes zonas de estudio.* 67

*Figura 31: Variabilidad climática estacional de nitratos en las diferentes zonas de estudio.* 68

*Figura 32: Variabilidad climática estacional del IRCA en las diferentes zonas de estudio.* 68

## Resumen

Se realizó un análisis quimiométrico de los parámetros utilizados por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga para determinar la calidad del agua suministrada a los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón, determinación que se hace mediante el Índice de Riesgo de Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA). Los datos se organizaron en matrices y se realizaron ANOVAs en función de la zona de procedencia del agua (Bucaramanga, Floridablanca y Girón), a su vez se hizo un análisis de componentes principales (PCA) para conocer los parámetros que generan mayor impacto en el IRCA. Los resultados del PCA permitieron la reducción de 11 variables a 4 componentes principales que muestran la correlación de las variables. Los parámetros importantes fueron: Sulfatos, Color Aparente, Cloro residual y Hierro. Al evaluar la incidencia de la variabilidad estacional en el cálculo del IRCA se encontró que, a excepción de los Cloruros, Nitratos y Dureza, los demás parámetros evaluados presentan una relación con el régimen bimodal de lluvias, característico de la zona objeto de estudio. Respecto a la variabilidad interanual se determinó que los Nitratos, Alcalinidad, Cloruros, Dureza y pH son los parámetros del IRCA que más correlacionan con el Índice Oceánico del Niño (ONI).

**Palabras-clave:** IRCA, Parámetros fisicoquímicos, ANOVA, análisis PCA, Variabilidad climática.

### **Abstract**

A chemometric analysis of the parameters used by the Bucaramanga Metropolitan Aqueduct was carried out to determine the quality of the water supplied to the municipalities of Bucaramanga, Floridablanca and Girón, a determination made through the Water Quality Risk Index for Human Consumption (IRCA). The data were organized in matrices and ANOVAs were performed according to the area of origin of the water (Bucaramanga, Floridablanca and Girón), in turn a major component analysis (PCA) was done to know the parameters that generate the greatest impact in the IRCA. The PCA results allowed the reduction of 11 variables to 4 main components that show the correlation of the variables. The most important parameters were: Sulphates, apparent color, residual chlorine and iron. When we evaluate the incidence of seasonal variability in the IRCA calculation, it was found that, other than chlorides, nitrates and hardness, the other parameters evaluated have a relation with the bimodal rainfall regime, characteristic of the area under study. Regarding the interannual variability, the variables Nitrate, Alkalinity, Chlorides, Hardness and pH were found to be the IRCA parameters most correlated with the Oceanic Niño Index (ONI).

**Key words:** IRCA, ANOVA, AMC, Correlation, Climatic variability.

## **Introducción**

La caracterización y evaluación de la calidad del agua para consumo humano es un aspecto de alta complejidad, esto debido a la importancia del uso que se le da al agua suministrada a nivel local, por lo tanto, una evaluación inapropiada de la calidad del agua tendría graves implicaciones en términos de salud para las personas que utilicen este suministro de agua en sus actividades diarias, como son la preparación de los alimentos y el aseo personal entre otras.

Existen diferentes metodologías de cálculo para determinar la calidad del agua para consumo humano, estas metodologías difieren en las ecuaciones usadas, las variables físicas, químicas y microbiológicas seleccionadas para su determinación, así como los valores o puntajes de favorabilidad y los límites entre los cuales deben estar las variables seleccionadas. En Colombia la metodología usada es la propuesta en la Resolución No. 2115 de 2007, titulada Índice de Riesgo de Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA), en la que se define el IRCA como el grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano.

El estudio del IRCA, su formulación y la interacción entre las variables seleccionadas por este, es el objetivo de esta tesis, en donde se evaluó adicionalmente la incidencia de la variabilidad estacional e interanual en el cálculo del mismo, y se propone un nuevo modelo matemático de cálculo para Bucaramanga, Girón y Piedecuesta, que elimina la comparación entre los valores medidos y los límites aceptados de las variables físicas, químicas y microbiológicas necesarias para el cálculo de éste, por lo que se disminuye el error introducido por quien realiza el cálculo.

## 1. Planteamiento del Problema

### 1.1 Definición del Problema

De todos los recursos naturales, el agua es, indiscutiblemente, el más esencial y valioso. La vida comenzó en el agua, y la vida se nutre con agua. Hay organismos, tales como los anaerobios, que pueden sobrevivir sin oxígeno. Pero ningún organismo puede sobrevivir por mucho tiempo sin agua. Trasladando esto a la sociedad humana, el agua tiene un papel fundamental como iniciador y sustentador de las civilizaciones durante toda la historia humana. Hasta finales de la década de 1960, el interés primordial en el agua había sido su cantidad.

Excepto en situaciones manifiestamente indeseables, el agua disponible se consideraba automáticamente como agua utilizable. Sólo durante las últimas tres décadas del siglo XX, la calidad del agua ha adquirido tanta importancia como la cantidad de la misma. Sin embargo, resolver la pregunta ¿Cuál es la calidad del agua?, frente a ¿Cuál es la cantidad de agua?, la primera es más compleja de resolver. Así, mientras que la cantidad de agua está determinada por un solo parámetro, la calidad del agua depende de todas las sustancias en disolución, en forma coloidal o suspendida, recogidas a través de su ciclo geoquímico (Abbasi & Abbasi, 2012).

Por otro lado, una forma de describir la calidad de una muestra de agua es mediante una lista de las concentraciones de todo lo que la muestra contenga, pero dicha lista sería tan larga como el número de componentes analizados, y solo tendría sentido para expertos de calidad del agua. Por lo tanto, si se quisiera comparar la calidad de diferentes fuentes de agua, la comparación de la lista de los componentes o variables medibles de cada muestra, no sería una tarea fácil de cumplir. Por ejemplo, si para una muestra de agua se evalúan las variables: pH, Dureza, Cloruro, Sulfato, Hierro y Sodio, esta puede no ser tan mala, como consumir agua de

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

otra muestra con un solo constituyente (por ejemplo, mercurio en una concentración más alta de lo permisible). De este modo, para facilitar el trabajo se establecieron los índices de calidad de agua, los cuales tratan de dar herramientas para la toma de decisiones. Sin embargo, cabe recordar que dichos índices corresponden a formulaciones matemáticas que integran un gran número de variables en una sola respuesta, y en la mayoría de las ocasiones se desconoce el contexto de su aplicación, privilegiando su fácil y rápida interpretación (Beamonte, Bermúdez, Casino, & Veres, 2003).

Los efectos de la variabilidad climática cada vez tienen mayor intensidad sobre los recursos hídricos en el territorio nacional, afectando su disponibilidad y sus parámetros fisicoquímicos. En esa medida, el estudio de la variabilidad climática se ha vuelto un tema fundamental para encaminar los recursos hacia las demandas de esta problemática. Las relaciones entre estos factores y las condiciones locales y regionales, los estudios de impacto sobre la respuesta hidrológica en el contexto de la variabilidad y cambio climático adquieren alta complejidad (García, Piñeros, Bernal, & Ardila, 2012).

En función de lo anterior se formula la pregunta de investigación que guió la realización de este proyecto: ¿De qué manera, para los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón, mediante análisis quimiométrico se puede establecer que la formulación matemática empleada para calcular el IRCA, es adecuada, y cómo las condiciones estacionales e interanuales del clima inciden en su cálculo?.

### **1.2 Justificación**

El agua destinada al consumo humano debe cumplir con unos parámetros de calidad que garanticen la ausencia de microorganismos o sustancias químicas, que generen peligro para la salud de las personas (García, 2009). Es, por tanto, fundamental determinar su calidad luego de ser sometida al proceso de potabilización, y para esto, la legislación colombiana en la Resolución No. 2115 de 2007 establece la evaluación del IRCA. Para el cálculo de este índice se asigna un puntaje de riesgo a los parámetros físicos, químicos y microbiológicos cuyos valores superen los máximos aceptables, reportados en los capítulos II y III de la misma Resolución. Sin embargo, como la norma no especifica bajo qué criterios fueron asignados dichos puntajes, se propuso, a partir de los datos reportados durante los últimos nueve años, por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. para los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón, realizar un análisis quimiométrico de las variables usadas para el cálculo del IRCA y de éste modo determinar cuáles de éstos parámetros generan mayor impacto en el mismo.

Además, teniendo en cuenta que la variabilidad climática tiene un efecto importante sobre las características fisicoquímicas y biológicas de los cuerpos de agua (Blanco, Vásquez, Ramírez, & Navarrete, 2003) se propuso comprobar cómo dicha variabilidad incide en el cálculo de este indicador, estableciendo con ello el nivel de confiabilidad del mismo.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 General

Establecer, mediante análisis quimiométrico, si para los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón, la formulación matemática empleada para calcular el IRCA es adecuada, determinando a su vez cómo las condiciones estacionales e interanuales del clima inciden en su cálculo.

### 1.3.2 Específicos

- Cuantificar cuál (es) de los parámetro (s) del IRCA es (son) representativo (s) o genera (n) mayor impacto en el cálculo del mismo en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.
- Analizar los datos históricos de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos usados para calcular el IRCA en Bucaramanga, Floridablanca y Girón, entre los años 2008 y 2015.
- Evaluar la incidencia de la variabilidad estacional e interanual en el cálculo del IRCA en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

## 2. Marco Referencial

### 2.1 Marco Teórico

#### 2.1.1 Calidad del Agua

De acuerdo al documento, *Evaluación del cumplimiento del derecho humano al agua*, la calidad de este vital recurso está determinado por la hidrología, la fisicoquímica y la biología de la masa de agua a que se refiere y, se define como la condición general que permite que el agua se utilice para usos concretos (Defensoría del pueblo, 2009). Por ejemplo, “el agua de un río puede ser considerada apta para riego, pero por su carga de sedimentos o concentración de coliformes, ser inaceptable para consumo humano, sin antes ser tratada” (García, 2009).

La calidad del agua destinada al consumo humano implica la existencia de unas condiciones fisicoquímicas y bacteriológicas (García, 2009) que garanticen la ausencia de microorganismos o sustancias químicas, que puedan constituir una amenaza para la salud de las personas.

#### 2.1.2 Índices de Calidad de Agua (ICA)

Los ICA son expresiones matemáticas simples en las que se relacionan los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que determinan la calidad de la misma. Se han diseñado para sintetizar la información proporcionada por la gran cantidad de parámetros que participan en su diagnóstico, haciendo fácil identificar la fuente de las variaciones de su calidad y comunicando los resultados de una manera comprensible (Calvo, 2012).

Los ICA representan una herramienta que permite evaluar la calidad del agua que se utiliza en diversas actividades y tomar acciones de mitigación y control que garanticen un suministro seguro, y aunque los más recientes tienen como objetivo fundamental evaluar la

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

calidad del agua para consumo humano previo tratamiento (González, 2010), es crucial, también, determinar la calidad del agua resultante del proceso de potabilización, para asegurar que los consumidores no se enfermen y para hacer un seguimiento a las empresas prestadoras del servicio del acueducto.

En el caso de Colombia este aspecto está regulado en la Resolución No. 2115 del 2007 la cual contempla la evaluación del IRCA como herramienta de valoración del agua potable.

### 2.1.3 IRCA

El artículo 12 del Decreto 1575 del Ministerio de Protección Social (2007), define el IRCA como el grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el no cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano. Los parámetros o características que se tienen en cuenta para su determinación se muestran en la Tabla 1, en donde además, se registran los valores máximos permisibles en los que pueden estar presentes en la muestra de agua.

Tabla 1: *Valores permisibles de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para la calidad del agua de consumo humano.*

Características	Valor permisible	Unidades
Color Aparente	15	UPC
Turbiedad	2	UNT
pH	6,5-9	Unidades pH
Cloro residual libre	0,3- 2	mg/l
Alcalinidad total	200	mg CaCO <sub>3</sub> /l
Calcio	60	mg Ca/l
Manganeso	0,1	mg/l
Molibdeno	0,07	mg/l
Magnesio	36	mg/l

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

Características	Valor permisible	Unidades
Zinc	3	mg/l
Fosfatos	0,5	mg/l
Cloruros	250	mg Cl/l
Nitratos	10	mg/l
Nitritos	0,1	mg/l
Aluminio	0,2	mg/l
Sulfatos	250	mg/l
Hierro total	0,3	mg/l
Fluoruros	1	mg/l
COT	5	mg COT/l
Dureza total	300	mg CaCO <sub>3</sub> /l
Coliformes totales	0	Ufc/100ml
<i>Escherichia Coli</i>	0	Ufc/100ml

Fuente: Resolución 2115 de 2007.

### 2.1.3.1 Cálculo del IRCA

El IRCA por muestra se calcula mediante la siguiente ecuación citada en el Artículo 14 de la Resolución No. 2115 de 2007:

$$\text{IRCA}(\%) = \frac{\sum \text{Puntajes de riesgo asignado a las características no aceptables}}{\sum \text{Puntajes de riesgo asignados a todas las características analizadas}} \times 100\%$$

Los puntajes de riesgo (Tabla 2) son asignados a la característica física, química y/o microbiológica que no cumpla con su respectivo valor máximo aceptable.

El IRCA por mes se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{IRCA}(\%) = \frac{\sum \text{IRCAS obtenidos de cada muestra realizada en el mes}}{\text{Número total de muestras realizadas en el mes}}$$

Finalmente, una vez se obtiene el valor del IRCA, se determina el nivel de riesgo de acuerdo a lo registrado en la Tabla 3.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

Tabla 2: *Puntaje de riesgo asignado a cada característica para el cálculo del IRCA.*

<b>Características</b>	<b>Puntaje de riesgo</b>
Color Aparente	6
Turbiedad	15
pH	1,5
Cloro residual libre	15
Alcalinidad total	1
Calcio	1
Fosfatos	1
Manganeso	1
Molibdeno	1
Magnesio	1
Zinc	1
Dureza total	1
Sulfatos	1
Hierro Total	1,5
Cloruros	1
Nitratos	1
Nitritos	3
Aluminio	3
Fluoruros	1
COT	3
Coliformes totales	15
<i>Escherichia Coli</i>	25
Sumatoria de puntajes asignados	100

Fuente: Resolución 2115 de 2007.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

Tabla 3: *Clasificación del nivel de riesgo en salud según el IRCA y acciones que deben adelantarse.*

Clasificación IRCA (%)	Nivel de riesgo	Consideraciones
70,1-100,0	INVIABLE SANITARIAMENTE	Agua no apta para el consumo humano y requiere una vigilancia máxima, especial y detallada.
35,1-70,0	ALTO	Agua no apta para consumo humano y requiere una vigilancia especial.
14,1-35,0	MEDIO	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.
5,1-14	BAJO	Agua no apta para consumo humano, susceptible de mejoramiento.
0,0-5,0	SIN RIESGO	Agua apta para consumo humano. Continuar la vigilancia.

Fuente: Resolución 2115 de 2007.

El valor del IRCA puede variar entre cero (0) puntos cuando cumple con los valores aceptables para cada una de las características físicas, químicas y microbiológicas, y cien (100) puntos para el más alto riesgo cuando no cumple ninguno de ellos (Ministerio de Protección Social Ambiente Desarrollo y Vivienda, 2007).

Considerando que es necesario conocer el origen y significado de los parámetros del agua a continuación se presentan las definiciones, causas y posibles afectaciones a la salud de los parámetros que son analizados en el laboratorio del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P, entidad encargada de suministrar y monitorear la calidad del agua para los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

### ***2.1.3.2 Parámetros del IRCA***

#### ***2.1.3.2.1 Parámetros Físicos***

El agua que se suministra debe cumplir con los requerimientos de sabor, olor, color y turbiedad, en parte para evitar el mal sabor, pero también a causa de su uso en la elaboración de bebidas, preparación de alimentos y fabricación de textiles (Orellana, 2005).

- **Color Aparente:** Refleja la presencia de moléculas orgánicas derivadas de materia vegetal, pero este suele eliminarse en la etapa de filtración. Excepcionalmente, el color puede surgir de la presencia de minerales como hierro y manganeso. Las objeciones al color alto están generalmente en bases estéticas más que sobre la base de un peligro para la salud (The Environmental & Protection Agency, 2001)
- **Turbiedad:** Se define como la propiedad óptica que tiene una muestra de agua de absorber o reflejar un haz de luz, impidiendo su paso directamente (López, 1991). Surge de la presencia de partículas sólidas muy finamente divididas, tales como arcilla, sólidos de alcantarillado, lavados de limo, arena, materia orgánica. Las partículas que forman la turbiedad pueden interferir con el proceso de desinfección acarreado graves consecuencias, ya que como la turbidez puede ser causada por aguas residuales existe el riesgo de que los organismos patógenos puedan ser protegidos por la turbidez y por lo tanto escapar de la acción del desinfectante (The Environmental & Protection Agency, 2001).

#### ***2.1.3.2.2 Parámetros Químicos***

Los múltiples compuestos químicos disueltos en el agua pueden ser de origen natural o industrial y serán benéficos o dañinos de acuerdo a su composición y concentración (Orellana, 2005).

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

- Cloro residual libre: Indica que una suficiente cantidad de cloro fue añadida inicialmente al agua para inactivar las bacterias y algunos virus causantes de enfermedades diarreicas; y, que el agua se encuentra protegida de posibles recontaminaciones microbiológicas durante su almacenamiento o transferencia (Montesdeoca, s.f.). No hay significación directa con la salud humana en los niveles utilizados en el proceso de tratamiento del agua.
- Alcalinidad total: Es una medida de la capacidad del agua para neutralizar los ácidos y su llamada capacidad de amortiguación (resistencia al cambio de pH). Generalmente es debida a la presencia de bicarbonatos que se forman en reacciones en los suelos a través de los cuales se filtra el agua (The Environmental & Protection Agency, 2001). Hay poca importancia sanitaria conocida atribuida a la alcalinidad.
- Calcio: Es el elemento más importante y abundante en el cuerpo del ser humano. Junto con el magnesio son los principales causantes de la dureza. La presencia de este elemento en un suministro de agua es beneficiosa para la salud. Hay algunas evidencias que demuestran que la incidencia de enfermedades del corazón se reduce en áreas donde se suministra agua con un alto grado de dureza, cuyo componente primario es el calcio (The Environmental & Protection Agency, 2001).
- Cloruros: En el agua tratada, su presencia se debe al agregado de cloro en las plantas potabilizadoras como desinfectante. En altas concentraciones y en combinación con otras sales producen sabores desagradables (Orellana, 2005).
- Nitratos: Las concentraciones elevadas de nitratos generalmente se encuentran en el agua en zonas rurales por la descomposición de la materia orgánica y los fertilizantes

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

utilizados. Altas concentraciones de nitratos en el agua produce cianosis o metahemoglobinemia, que afecta especialmente a los niños menores de 6 años (Orellana, 2005).

- **Aluminio:** La sal, sulfato de aluminio compuesto ("alumbre") es muy utilizado en tratamiento de agua para eliminar el color y la materia no filtrable en aguas crudas. El alumbre se hidroliza y se convierte en un hidróxido flocculante que, siendo denso e insoluble, precipita con él, el color y las partículas turbias.

Se ha demostrado recientemente que representa un peligro para las personas que sufren de trastornos renales. Causa problemas neurológicos y se ha citado como un factor contribuyente a la enfermedad de Alzheimer (aunque aún faltan más pruebas) (The Environmental & Protection Agency, 2001)

- **Hierro Total:** El hierro se encuentra en cantidades significativas en suelos y rocas en formas insolubles. Sin embargo, muchas reacciones complejas pueden dar lugar a formas más solubles de hierro (The Environmental & Protection Agency, 2001). Se denomina, entonces, hierro total al que está presente tanto en solución como en suspensión en una muestra de agua (López, 1991). No produce trastornos en la salud en las proporciones en que se lo encuentra en las aguas naturales (Orellana, 2005).
- **Dureza total:** Las aguas duras son aquellas que requieren cantidades considerables de jabón para producir espuma y también forma incrustaciones en tuberías de agua caliente y calderas (Orellana, 2005). Es definida como la suma de las concentraciones de calcio y de magnesio expresadas en mg / l de  $\text{CaCO}_3$ . Estudios de salud en varios países indican que las tasas de mortalidad por cardiopatía son más bajas en áreas con agua dura (The Environmental & Protection Agency, 2001).

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

- pH: Se usa para expresar la intensidad de las condiciones ácidas o alcalinas de una solución. No representa problemas para la salud de las personas, pero sus valores extremos de acidez y alcalinidad tienen consecuencias organolépticas que afectan la palatabilidad del agua. El problema más urgente que origina es el efecto corrosivo dentro de la red de distribución (The Environmental & Protection Agency, 2001).

### **2.1.3.3 Parámetros Biológicos**

Las aguas poseen en su constitución una gran variedad de elementos biológicos desde los microorganismos hasta los peces. El origen de los microorganismos puede ser natural, es decir constituyen su hábitat natural, pero también provenir de contaminación por vertidos cloacales y/o industriales, como también por arrastre de los existentes en el suelo por acción de la lluvia (Orellana, 2005).

- Coliformes totales: Es un indicador de contaminación microbiológica del agua para consumo humano (Ministerio de Protección Social Ambiente Desarrollo y Vivienda, 2007).
- *Escherichia Coli*: Es un tipo de bacteria que vive en el intestino (humano y animal), razón por la cual es el indicador microbiológico de contaminación fecal en el agua para consumo humano (Ministerio de Protección Social Ambiente Desarrollo y Vivienda, 2007).

El consumo de agua contaminada microbiológicamente, genera altos riesgos de infección en los consumidores y el posible desarrollo de enfermedades relacionadas con la presencia de diversos organismos patógenos (The Environmental & Protection Agency, 2001).

### **2.1.4 Quimiometría**

La quimiometría consiste en la aplicación de técnicas matemáticas y estadísticas para extraer la información útil contenida en determinaciones experimentales. Así mismo, incluye técnicas que permiten entre otras cosas, la proyección de conjuntos de datos multivariados en gráficos bidimensionales conservando la información relevante para su inspección visual, (Burbano, 2009), la detección y descripción de las interrelaciones entre los parámetros determinantes, y a su vez, relacionarlos con los efectos resultantes. Permite, además, garantizar e interpretar los datos analíticos y químicos, optimizar y modelar los procesos analíticos y químicos, y extraer información de los datos experimentales tales como la identificación de grupos con comportamiento similar sea de muestras o de variables, y la clasificación de agrupamientos de objetos previamente establecidos (Tortajada, 2002).

Algunos de los principales métodos quimiométricos que se emplean en estudios medioambientales y que, además, se tuvieron en cuenta para el desarrollo del presente trabajo, se describen a continuación:

#### ***2.1.4.1 Análisis de Componentes Principales (PCA)***

PCA es un método matemático para organizar la información en un conjunto de datos, principalmente cuando se está en presencia de un número grande de variables. La estrategia de PCA, es descubrir nuevas variables llamadas Componentes Principales (PC) que apuntan a la mayor variabilidad en los datos. Esto permite describir la información con una cantidad de variables considerablemente menor que la cantidad original (Nuñez et.al., s.f.) para detectar la interdependencia tanto entre variables que caracterizan a cada uno de las muestras como también entre muestras (Pia, 2001).

### ***2.1.4.2 Análisis de Varianza (ANOVA)***

Se aplica esta metodología cuando se tiene una variable que se ha medido en distintos grupos independientes y se requiere saber si ésta es igual o varía entre los grupos, y si dicha variación es producto del azar o en efecto son variaciones que se pueden atribuir a la población de donde es tomada la muestra. La hipótesis del ANOVA es probar si las evaluaciones medias en los distintos grupos son iguales o por el contrario son diferentes (Otero, Herrarte, & Medina, 2005).

### ***2.1.4.3 Análisis Clúster***

El Análisis Clúster, conocido como Análisis de Conglomerados, es una técnica estadística multivariante que busca agrupar variables para medir la similitud entre ellas. Una vez medida la similitud se agrupan en: grupos homogéneos internamente y diferentes entre sí (de la Fuente Fernández, 2011).

### ***2.1.4.4 Medidas de Tendencia Central***

De acuerdo con Vergara Schmalbach & Quesada Ibarguen (s.f.), las medidas de tendencia central son indicadores estadísticos que muestran hacia qué valor (o valores) se agrupan los datos, resumiendo así, en un solo valor a un conjunto de valores. Las medidas de tendencia central más utilizadas son: media aritmética, moda y mediana.

#### ***2.1.4.4.1 Media Aritmética***

Es el valor resultante que se obtiene al dividir la sumatoria de un conjunto de datos ( $X_i$ ) sobre el número total de datos ( $N$  ó  $n$ ). Para diferenciar datos muestrales de datos poblacionales, la media aritmética se representa con un símbolo para cada uno de ellos: si se

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

trabaja con la población, este indicador será  $\mu$ ; en el caso de que se trabaje con una muestra, el símbolo será  $\bar{X}$ . Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \text{ Poblacional} \qquad \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \text{ Muestra}$$

### **2.1.4.4.2 Moda**

Indica el valor que más se repite, o la clase que posee mayor frecuencia. En el caso de que dos valores presenten la misma frecuencia, se dice que existe un conjunto de datos bimodal. Para más de dos modas se habla de un conjunto de datos multimodal.

### **2.1.4.4.3 Mediana**

Valor que divide una serie de datos en dos partes iguales. La cantidad de datos que queda por debajo y por arriba de la mediana son iguales (Vergara Schmalbach & Quesada Ibarguen, s.f.).

### **2.1.4.5 Medidas de Dispersión**

Indican la distancia promedio de los datos respecto a las medidas de tendencia central. Dicho en otros términos, pretenden evaluar en qué medida los datos difieren entre sí. Las medidas de dispersión más utilizadas son: Desviación media, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación (Vergara Schmalbach & Quesada Ibarguen, s.f.).

#### **2.1.4.5.1 Desviación Media**

La desviación media ( $D_m$ ) Indica qué tan disperso se encuentra un conjunto de datos respecto a la media aritmética. Equivale a la división de la sumatoria del valor absoluto de las distancias existentes entre cada dato y su media aritmética  $|X_i - \bar{X}|$  y el número total de datos (n) (Vergara Schmalbach & Quesada Ibarguen, s.f.).

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n}$$

#### 2.1.4.5.2 Varianza

La varianza ( $S^2$  ó  $\sigma^2$ ) es una forma de asegurar que las diferencias entre la media y los datos de un valor positivo. Se calcula dividiendo la sumatoria de las distancias existentes entre cada dato y su media aritmética elevadas al cuadrado, y el número total de datos.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad \text{o} \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N}$$

Se distinguen dos símbolos para identificar la varianza:  $S^2$  para datos muestrales, y  $\sigma^2$  para datos poblacionales (Vergara Schmalbach & Quesada Ibarquien, s.f.).

#### 2.1.4.5.3 Desviación Estándar

Como la varianza transforma todas las distancias a valores positivos elevándolas al cuadrado, con el inconveniente de elevar consigo las unidades de los datos originales, la desviación estándar ( $S$ ) soluciona el problema obteniendo la raíz cuadrada de la varianza, consiguiendo así un valor similar a la desviación media. Así, la desviación estándar o típica es igual a la raíz cuadrada de la varianza (Vergara Schmalbach & Quesada Ibarquien, s.f.).

$$s = \sqrt{s^2} \quad \text{o} \quad \sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

#### 2.1.4.5.4 Coeficiente de Variación

El coeficiente de variación ( $C_V$ ) permite comparar la dispersión entre dos poblaciones distintas e incluso, comparar la variación producto de dos variables diferentes (que pueden provenir de una misma población). Estas variables podrían tener unidades diferentes. El coeficiente de variación elimina la dimensionalidad de las variables, y tiene en cuenta la proporción existente entre una medida de tendencia y la desviación típica o estándar. En otras palabras, el  $C_V$  equivale a la razón entre la media aritmética y la desviación típica o estándar.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

$$C_V = \frac{s}{\bar{X}} \text{ o } C_V = \frac{\sigma}{\bar{\mu}}$$

Si en lugar de la media aritmética se emplea la mediana, se obtiene el coeficiente de variación mediana (Vergara Schmalbach & Mesada Ibarra, s.f.).

$$C_V = \frac{s}{e} \text{ o } C_V = \frac{\sigma}{e}$$

### 2.1.5 Clima y Variabilidad Climática

Uno de los objetivos de este proyecto fue evaluar la incidencia de la variabilidad estacional e interanual en el cálculo del IRCA en las zonas de estudio (Bucaramanga, Floridablanca y Girón) y, por lo tanto, es importante enmarcar este objetivo dentro del concepto de clima y de variabilidad climática en las escalas temporales que se consideran para efectos de éste trabajo.

#### 2.1.5.1 Clima

El clima es el conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, el cual se caracteriza por los estados y evoluciones del tiempo en un lugar o región determinado, durante un período de tiempo relativamente largo (Montealegre & Pabón, 2002).

#### 2.1.5.2 Variabilidad Climática

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones observadas en los valores de las variables climatológicas (temperatura, radiación solar, humedad, presión, precipitación, etc.), por encima o por debajo de lo normal durante períodos de tiempo relativamente cortos. Durante un año en particular, se registran valores por encima o por debajo de lo normal. La normal climatológica o valor normal representa el valor promedio de una serie continua de mediciones de una variable durante un período de por lo menos 30 años y se utiliza para definir y comparar

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

el clima. A la diferencia entre el valor registrado de la variable y su promedio se le conoce como anomalía.

Dicho en otras palabras, la secuencia de las oscilaciones de los valores de las variables climatológicas alrededor de los valores normales, se conoce como variabilidad climática y su valoración se logra mediante la determinación de las anomalías (Montealegre & Pabón, 2002).

### *2.1.5.2.1 Escalas de Variabilidad Climática*

El clima varía naturalmente en diferentes escalas de tiempo y espacio. Dentro de sus fluctuaciones temporales están:

- Estacional: A esta escala corresponde la fluctuación del clima a nivel mensual. La determinación del ciclo anual de los elementos climáticos es una fase fundamental dentro de la variabilidad climática a este nivel. En latitudes medias, la secuencia de las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño es algo común para los habitantes de dichas regiones, y la planeación de sus actividades gira alrededor de esta alternancia. En tanto que, en latitudes tropicales, como Colombia, lo frecuente es la ocurrencia de temporadas lluviosas y secas.

Por lo tanto, el planeamiento de las actividades, particularmente las agroindustriales, energéticas y de transporte, dependen del conocimiento de este tipo de secuencia periódica (Pabón & Montealegre, 2000).

- Interanual: En esta escala se ubican las variaciones que se presentan en las variables climatológicas de año en año. Normalmente se percibe que la precipitación de la estación lluviosa en un determinado lugar, no siempre es la misma de un año a otro, sino que fluctúa por encima o por debajo de lo normal. La variabilidad climática, enmarcada dentro de esta escala, podría estar relacionada con alteraciones en el balance

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

global de radiación. Un ejemplo típico de la variabilidad climática interanual corresponde a los fenómenos enmarcados dentro de los eventos de la Oscilación del sur - El Niño ENSO (por sus iniciales en inglés) y la oscilación Cuasibienal (Pabón & Montealegre, 2000).

### *2.1.5.2.2. Variabilidad Climática en Colombia*

Los fenómenos de variabilidad climática a nivel estacional que, gobiernan el clima de Colombia, están controlados en gran medida por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), y por la dinámica de los océanos Pacífico y Atlántico, y las cuencas del Amazonas y el Orinoco. Lo anterior resulta en una compleja respuesta hidrológica que, entre otros aspectos, dificulta la toma de decisiones para determinar el comportamiento de los recursos hídricos ante eventos de variabilidad. Por ejemplo, la migración de la ZCIT (sistema productor de lluvias), permite explicar el comportamiento anual de la precipitación (Arango, Dorado, Guzmán, & Ruíz, 2012).

La variabilidad climática interanual, está asociada con el ciclo El Niño y La Niña. El Niño es la causa de la mayor señal de ésta variabilidad en Colombia y está relacionado con el calentamiento de la superficie del Océano Pacífico por varios meses. Sus efectos son notables en el norte de la región Pacífica, los departamentos de la región Andina y en los departamentos de la región Caribe.

La Niña, en el país, se caracteriza por un aumento considerable de las precipitaciones (anomalías positivas) y una disminución de las temperaturas (anomalías negativas) en las regiones Andina, Caribe y Pacífica, así como en áreas del piedemonte de los Llanos orientales, mientras que en la zona oriental (Orinoquía y Amazonía), dichas variables tienden a un comportamiento cercano a lo normal, sin ser muy claro el patrón climatológico ante la

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

presencia de un evento frío. La ocurrencia del fenómeno de La Niña se ha caracterizado por un importante componente atmosférico y, según revelan los indicadores correspondientes, se trata de uno de los episodios más intensos del último siglo, con un fuerte acoplamiento océano-atmósfera (Sistema de Información Ambiental de Colombia, s.f.)

### ***2.1.5.3 Índices Climáticos***

Un índice climático es un valor que puede ser usado para describir el estado y los cambios en el sistema climático. Los índices climáticos permiten realizar análisis estadísticos tales como la comparación de series de tiempo, la estimación de medias y la identificación de valores extremos y tendencias.

Los indicadores más empleados para el Niño son el SOI, el MEI y el ONI (Jiménez, 2014), pero para efectos del presente trabajo sólo se consideró el indicador ONI.

#### ***2.1.5.3.1 Índice Oceánico de El Niño (ONI)***

El Índice Oceánico de El Niño – ONI (por sus iniciales en inglés), es el estándar que la National Climatic Data Center de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estado Unidos, utiliza para identificar eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) en el océano Pacífico tropical. Se calcula como la media móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar para la región El Niño 3,4 (es decir, la franja comprendida entre 5°N-5°S y 120°-170°W).

Para efectos históricos, la identificación de episodios cálidos El Niño (anomalías positivas) o fríos La Niña (anomalías negativas), se da cuando el valor del ONI supera el umbral de +0,5°C para El Niño o es inferior a -0,5°C para La Niña, durante por lo menos cinco períodos consecutivos (Xm filial de isa, 2014).

### **2.1.6 Generalidades de la Zona de Estudio**

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los municipios que conforman el área de estudio, los cuales se encuentran en el departamento de Santander ubicado al nororiente de Colombia y que, junto con el municipio de Piedecuesta, integran el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB).

#### ***2.1.6.1 Bucaramanga***

El municipio de Bucaramanga es la capital del departamento de Santander; la cabecera municipal está situada a 7° 08' de latitud norte con respecto al Meridiano de Bogotá y a 73° 08' de longitud al Oeste de Greenwich. Su extensión total es de 162 km<sup>2</sup>, y limita con los siguientes municipios: Al norte con Río Negro; al oriente con Matanza, Charta y Tona; al sur con Floridablanca y; al occidente con Girón.

Fisiográficamente se encuentra en una terraza inclinada de la Cordillera Oriental sobre el valle del Río de Oro. La topografía de Bucaramanga es en promedio un 15% plana, 30% ondulada y el restante 55% es quebrada. Tres grandes cerros se destacan a lo largo del territorio: Morro Rico, Alto de San José y El Cacique.

Los ríos principales son: El Río de Oro y el Suratá y las quebradas: La Flora, Tona, La Iglesia, Quebrada Seca, Cacique, El Horno, San Isidro, Las Navas, La Rosita, Bucaramanga. El clima de Bucaramanga es templado - seco. El promedio de lluvia total anual es de 1303 mm. Durante el año las lluvias se distribuyen en dos temporadas secas y dos temporadas lluviosas. Los meses más secos son diciembre, enero y febrero, y en menor proporción, junio, julio y agosto. Las temporadas de lluvia se extienden de marzo a mayo y de septiembre a noviembre. En los meses secos de principios de año, llueve alrededor de 10 días/mes; en los meses de mayores precipitaciones, así como en la temporada seca de mitad de año, puede llover de 17 a

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

19 días/mes. La temperatura promedio es de 22,6°C. Al medio día la temperatura máxima media oscila alrededor de 28°C. En la madrugada la temperatura mínima está entre los 18 y los 19 °C. La humedad relativa del aire es mayor a 80% en promedio y en épocas de lluvias alcanza valores superiores al 84% (Alcaldía de Bucaramanga., s.f.)

### ***2.1.6.2 Floridablanca***

El municipio de Floridablanca está localizado a un km de distancia de Bucaramanga; la cabecera municipal del municipio está situada 7° 04'11" de latitud norte y 73°05'52" de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Su extensión total es de 100,35 km<sup>2</sup>, y sus límites son: Por el norte Bucaramanga y Tona; por el oriente Tona y Piedecuesta; por el sur Piedecuesta, y por el occidente Girón y Bucaramanga.

Posee terrenos en las tres zonas geomorfológicas: El macizo de Santander, la zona de mesa (Ruitoque) y el valle intermontano; en esta última se localiza su casco urbano. Se encuentran alturas que oscilan entre 750 y 3000 metros sobre el nivel del mar.

Hidrográficamente pertenece a la cuenca del Río Lebrija y tiene dos subcuencas: La de Río Frío y la de Río de Oro (bajo medio). De la subcuenca de Río Frío dependen las microcuencas: Río Frío Alto, Río Frío Bajo, Zapamanga, Aranzoque Mensuli.

Su clima está clasificado como tropical. En comparación con el invierno, los veranos tienen mucha más lluvia. La temperatura media anual es 23,6 °C. La precipitación media aproximada es de 1055 mm (Alcaldía de Floridablanca, s.f.)

### ***2.1.6.3 Girón***

El municipio de Girón está localizado a nueve km de distancia de Bucaramanga; la cabecera municipal está situada 7° 04'15" de latitud norte y 73° 10' 20" de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Su extensión total es de 475,14 km<sup>2</sup>, la temperatura media anual es

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

17,2 °C y los municipios con los que limita son: al norte con Lebrija y Río Negro; al sur con Los Santos, Zapatoca y Betulia; al este con Bucaramanga, Floridablanca y Piedecuesta y al oeste con Sabana de Torres.

Fisiográficamente se ubica en el costado occidental de la cordillera Oriental, entre el piedemonte cordillerano y el valle del Magdalena Medio santandereano, lo cual le permite poseer terrenos en el valle intermontano, donde se localiza el casco urbano. Debido a esta situación el municipio posee terrenos con cierta variedad fisiográfica y de biodiversidad.

Hidrográficamente hace parte de la Cuenca Superior del Río Lebrija y de la Cuenca Media del Río Sogamoso. En la primera se localizan las subcuencas de Lebrija Alto y Río de Oro, y dentro de ellas las microcuencas de la Angula Alta, Oro Medio y Oro Bajo. La importancia de estas microcuencas radica en que sobre ellas se ha asentado la mayoría de la población del municipio. La cuenca del Río Sogamoso posee la Subcuenca del Sogamoso Medio y de ella forman parte las microcuencas Sogamoso Medio Alto, Sogamoso Medio y Sogamoso Medio Bajo; siendo las tierras de estas microcuencas las más promisorias para las actividades agropecuarias.

Las precipitaciones son escasas y no se distribuyen uniformemente en el municipio debido a las barreras naturales y a la influencia de los vientos cálidos provenientes de los cañones del Chicamocha y Suárez. Su clima es cálido y templado. En invierno hay mucho menos lluvia que en verano. La precipitación media aproximada es de 742 mm (Girón, 2015).

### **2.2 Marco Legal**

En la Tabla 4 se presenta una descripción de la normatividad pertinente para el desarrollo del trabajo de investigación.

Tabla 4: *Normatividad del agua para consumo humano.*

ítem	Norma	Descripción
1	Decreto 1575 de 2007	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
2	Resolución 2115 de 2007	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

### 3. Método

#### 3.1 Tipo de Estudio

Se tuvieron en cuenta tres tipos de estudio: Correlacional, explicativo y no experimental. Inicialmente el estudio fue correlacional, debido a que se puede conocer cómo se comporta una variable a partir del comportamiento de la otra, es decir se visualiza cómo se vinculan las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas usadas para calcular el IRCA, o si por el contrario no existe relación entre ellas.

Con el estudio de tipo explicativo se establecieron patrones de variabilidad climática estacional e interanual que pueden incidir en el cálculo del IRCA en Bucaramanga, Floridablanca y Girón; teniendo como período de estudio los datos comprendidos entre los años 2008 – 2015. El estudio de tipo no experimental longitudinal se dió en razón a que no se manipularon las variables, y tampoco fueron sometidas a pruebas.

### 3.2 Población y Muestra

Se trabajó con los datos de los parámetros medidos, por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, para determinar el IRCA. La muestra a analizar estuvo compuesta por 288 observaciones, repartidas en tres grupos, correspondientes a las zonas de Bucaramanga, Floridablanca y Girón (96 observaciones por cada grupo), a su vez, divididos (cada uno de los grupos) en 8 años de estudio, esto es, del 2008 al 2015 (12 observaciones cada año). De dichos años, se calculó el IRCA y se obtuvieron los promedios mensuales en los parámetros que se registran en la Tabla 5.

Tabla 5: *Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos a estudiar.*

Parámetro	Unidades
Cloro residual	mg/l
Turbiedad	UNT
Color Aparente	UPC
pH	Unidades
Aluminio	mg Al/l
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /l
Dureza	mg CaCO <sub>3</sub> /l
Cloruros	mg Cl/l
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /l
Hierro	mg Fe/l
Nitratos	mg NO <sub>3</sub> /l
Coliformes totales	Ufc/100 ml
<i>Escherichia Coli</i>	Ufc/100ml

Fuente: Elaboración propia a partir de la Resolución 2115 de 2007.

### 3.3 Fuente de Información

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron como fuente de información primaria: Informes del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga y datos reportados por la NOAA.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

Adicionalmente, se consultaron fuentes secundarias como trabajos de grado, monografías, y artículos de revistas científicas, relacionadas con las temáticas de quimiometría, variabilidad climática estacional e interanual, e índices de calidad de agua para consumo humano.

### **3.1.1 Datos de los Parámetros del IRCA**

Los valores de los parámetros del IRCA analizados fueron obtenidos del laboratorio de Control de Calidad de Aguas del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P, el cual abastece los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

### **3.1.2 Datos de las Variables Macroclimáticas**

Para el desarrollo de este trabajo, la variable macroclimática utilizada fue el ONI, calculado por la NOAA y disponible en la página [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml).

## **3.4 Metodología**

### **3.4.1 Cuantificación de los Parámetro (s) del IRCA que Genera (n) Mayor Impacto en el Cálculo del IRCA**

Inicialmente se organizó y agrupó la información en una sola base mediante Excel. Para el caso del Hierro, parámetro físico del que no se disponía de todos los datos, se estimaron los valores ausentes utilizando uno de los principales procedimientos del método de imputación, llamado sustitución por la media (Medina & Galván, 2007), mediante el cual, se reemplazaron los valores faltantes por el promedio mensual multianual.

Posteriormente, se llevaron a cabo, utilizando el paquete estadístico PAST, una serie de ANOVAs de un factor con el fin de comparar las medias de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos usados en el cálculo del IRCA, en función de la zona de procedencia de las

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

muestras de agua (Bucaramanga, Floridablanca y Girón). Además se hizo un análisis de ACP para establecer las causas de la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos usados para calcular el IRCA y ordenarlos por importancia; y finalmente se realizó un análisis clúster con el fin de agrupar los parámetros tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos conformados.

### **3.4.2 Análisis de los Datos Históricos**

A partir de la base de datos elaborada en Excel y, utilizando el software estadístico PAST, se aplicó estadística descriptiva a los parámetros fisicoquímicos usados en el cálculo del IRCA. Posteriormente, se elaboraron diagramas de cajas y bigote, y gráficas de secuencia para cada una de las variables en estudio.

### **3.4.3 Análisis de la Variabilidad Climática Estacional e Interanual**

Para evaluar la variabilidad climática estacional en el cálculo del IRCA en Bucaramanga, Floridablanca y Girón se estimaron los valores medios por trimestres de los parámetros fisicoquímicos usados en el cálculo del IRCA y del IRCA en sí mismo, mediante el Paquete estadístico PAST, con el fin de determinar la influencia de los regímenes de lluvias y sequías, seca mayor (Diciembre a Febrero), lluviosa menor (Marzo a Mayo), seca menor (Junio a Agosto) y lluviosa mayor (Septiembre a Noviembre) en el cálculo del IRCA.

El análisis de la variabilidad climática interanual se estimó mediante la correlación bivariada entre el índice de variabilidad climática interanual ONI y cada uno de los parámetros fisicoquímicos y del IRCA, a partir del coeficiente de correlación lineal de Pearson con p bilateral existente, para esto las variables fueron estandarizadas (restando la media y dividiendo entre la desviación típica mensual).

## 4. Resultados

### 4.1 Cuantificación de los Parámetro (s) del IRCA que Genera (n) Mayor Impacto en el Cálculo del IRCA

Se utilizó una ANOVA como test de significación estadística para la comparación de las medias de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos usados para calcular el IRCA (Tabla 6). Es de aclarar que los parámetros microbiológicos, coliformes totales y *Escherichia Coli*, tuvieron presentes en ninguna de las muestras estudiadas.

Tabla 6: ANOVAs de un factor (zona de procedencia) en función de parámetros fisicoquímicos usados en el cálculo del IRCA.

Parámetro	F	P	<sup>2</sup> (%)
Nitratos	136,31	0,000	51
Cloro residual	120,69	0,000	50
Alcalinidad	116,54	0,000	45
Sulfatos	83,76	0,000	37
Dureza	53,57	0,000	32
pH	47,04	0,000	21
Turbiedad	20,54	0,000	12
Color Aparente	15,23	0,000	10
Cloruros	11,64	0,000	8
Aluminio	0,96	0,384	n/a
Hierro	0,58	0,561	n/a

Fuente: Elaboración propia

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

Se encontró que las muestras tienen diferencias significativas en la mayoría de los parámetros analizados, exceptuando el aluminio y el hierro. Lo anterior se estableció teniendo en cuenta los porcentajes del eta cuadrado, así: 1%, poco efecto del factor; 6%, efecto medio; y superior al 14%, efecto grande (Cohen, 1977).

Los nitratos y el cloro residual diferencian a las muestras en las distintas zonas de una forma más importante que el resto de los parámetros ya que presentan un eta cuadrado (  $\eta^2$ ) del 51% y 50% respectivamente.

Para identificar visualmente cuáles muestras son significativamente diferentes de cuáles otras, se utilizaron las Pruebas de Rangos Múltiples entre las que se encuentra el método de Tukey HSD, el cual ensancha los intervalos para permitir comparaciones múltiples entre todos los pares de medias (Statgraphics, 2006).

El Diagrama de cuadros HSD Tukey, mostrado en la Tabla 7, es una recopilación de los contrastes a posteriori (de los ANOVAS del paso anterior), calculados con PAST, y el gráfico que se ve de fondo es un conjunto de minigráficos calculados en Excel. En esta tabla sólo se muestran los parámetros en los cuales se rechazó la hipótesis nula ( $H_0$ ) en el contraste de ANOVA y se aclara que los números representan las medias de cada grupo.

Los cuadros tienen tres tamaños: El más grande, representa la media significativamente más elevada (de acuerdo con el HSD de Tukey y un alfa de 0,05) y así sucesivamente con los demás tamaños. Los cuadros de igual tamaño, ubicados en la misma fila, corresponden a medias que no difieren significativamente.

A partir de la Tabla 7 se observan patrones diferentes en el agua de las distintas zonas; el agua de Bucaramanga cuenta con mayor alcalinidad, dureza, cloruros y sulfatos que la de Floridablanca y Girón. El agua de Floridablanca cuenta con más turbiedad y nitratos, mientras

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

que la de Girón, con más pH. En cuanto al cloro residual de la muestra, hay mayor presencia de éste en Bucaramanga y Floridablanca, y el color aparente es más alto en Floridablanca y Girón.

Tabla 7: Diagrama de cuadros HSD Tukey (contraste a posteriori de las medias) de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos usados en el cálculo del IRCA en función de la zona de procedencia.

Parámetro	Bucaramanga	Floridablanca	Girón
Cloro residual (mg/L)	0,95	0,94	0,80
Turbiedad (UNT)	1,03	1,32	1,17
Color Aparente (UPC)	5,32	7,06	6,78
Nitratos (NO <sub>3</sub> /L)	1,23	2,45	1,69
pH (Unidades)	7,27	7,17	7,34
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	48,47	33,78	42,00
Dureza (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	65,65	48,79	59,18
Cloruros (mg Cl/L)	3,32	2,76	2,97
Sulfatos (mg SO <sub>4</sub> /L)	26,26	17,33	21,46

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se llevó acabo la prueba de esfericidad de Bartlett, método asociado al análisis factorial, el cual, al igual que el análisis de componentes principales, busca la reducción de la dimensionalidad de los datos (Aplicada, s.f.). Dicha prueba, de acuerdo a lo expuesto por Skoczenski & Norcia (2002), permitió rechazar la hipótesis nula que establece la igualdad de la matriz de correlaciones entre las variables y la matriz identidad, al arrojar un chi

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

cuadrado ( $\chi^2$ ) de 1353,27 y un nivel de la probabilidad de aceptación de la hipótesis nula menor a 0,05 (0,000); concluyéndose así, que es factible realizar un Análisis de Componentes Principales (PCA).

El PCA se efectuó con el fin de establecer las causas de la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos usados para calcular el IRCA (sin tener en cuenta los indicadores de coliformes totales y *Escherichia Coli* por presentar el valor 0 fijo). Para este análisis se estandarizaron las puntuaciones de modo que fuesen comparables a través de las distintas unidades de medida (también conocido como Análisis de Componentes Principales basado en correlaciones), y se usó un método de rotación VARIMAX con normalización de Kaiser, de modo que se obtuviera la mayor ortogonalidad posible entre los componentes. Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: *Matriz de componente rotado de los parámetros fisicoquímicos usados en el cálculo del IRCA.*

<b>Parámetro</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
<b>Sulfatos</b>	<b>0,86</b>			
Dureza	0,82			
Nitratos	-0,79			
Alcalinidad	0,74			
Cloruros	0,73			
<b>Color Aparente</b>		<b>0,76</b>		
Turbiedad		0,75		
Aluminio		0,64		
<b>Cloro residual</b>			<b>0,84</b>	
pH			-0,75	
<b>Hierro</b>				<b>0,87</b>
Varianza explicada	39,50 %	12,58 %	11,84 %	8,47 %
Autovalor	4,35	1,38	1,30	0,93

Nota: No se muestran las cargas factoriales menores a 0,4.

Fuente: Elaboración propia

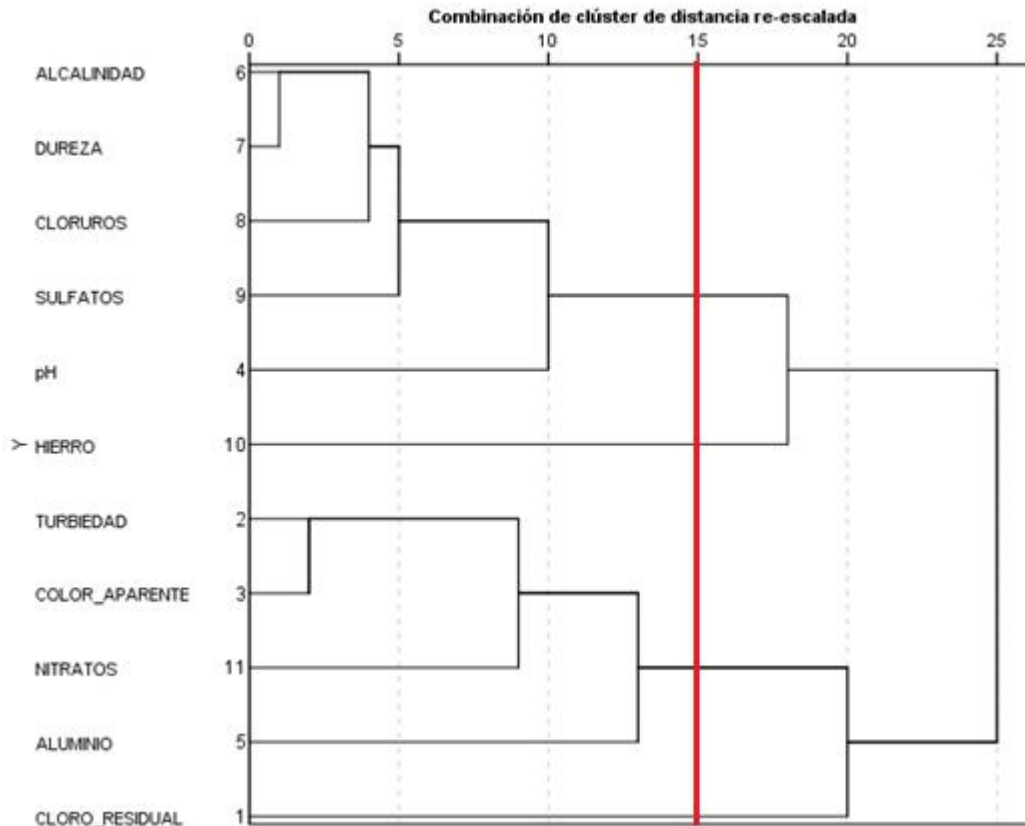
## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

Utilizando el criterio de Kaiser, que consiste en conservar aquellos factores cuyo autovalor asociado sea mayor o igual a 1 (Fernández, 2011), se extrajeron 3 componentes (C1, C2, y C3), sin embargo, se incluyó un cuarto componente (C4) a pesar de que el autovalor fuese un poco menor a 1 (0,93), ya que la variabilidad explicada aumentaba de forma importante con la inclusión del mismo.

La Tabla 8 presenta una estructura clara y diferenciada en cuanto a los cuatro componentes lográndose la explicación del 72,39% de la varianza, lo cual es adecuado. El primero explica 39,5% de la varianza total y está conformado por los parámetros de sulfato, dureza, nitratos (el cual posee una carga negativa), alcalinidad y cloruros. El segundo componente explica el 12,58% de la varianza y está conformado por el color aparente, turbiedad y aluminio. El tercer componente explica el 11,84% de la varianza y lo conforma el cloro residual y pH (con carga negativa); mientras que el cuarto componente explica el 8,47% de la varianza y está conformado por el hierro.

Finalmente, se realizó un análisis clúster jerárquico entre variables, tomando las distancias euclídeas como parámetro de recorrido entre éstas y usando un enlace promedio para determinar la distancia entre los conglomerados. Dicho análisis tuvo como finalidad agrupar los parámetros fisicoquímicos usados para calcular el IRCA, tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los mismos. Para resumir el proceso de agrupación en el análisis de clústers se construyó una representación gráfica en forma de árbol o dendograma cómo se muestra en la Figura 1.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA



*Figura 1: Dendrograma que utiliza un enlace promedio (entre grupos conformados por los parámetros fisicoquímicos usados en el cálculo del IRCA).*

Fuente: Elaboración propia.

Al observar el dendrograma se puede estimar que el punto de corte adecuado es 15 formando 4 grupos: el primer clúster está conformado por la alcalinidad, dureza, cloruros, sulfatos y el pH; el hierro forma el segundo clúster; la turbiedad, color aparente, nitratos y aluminio se agrupan en el tercer clúster, y finalmente el cloro residual conforma el cuarto clúster.

En conclusión, el análisis de componentes principales y el análisis clúster presentan una estructura similar, arrojando como resultado que los parámetros más importantes son sulfatos, color aparente, cloro residual y hierro, para el componente 1 a 4 respectivamente.

### 4.2 Análisis de los Datos Históricos

A continuación, se presentan los análisis de estadística descriptiva realizados a los parámetros fisicoquímicos durante el período comprendido entre los años 2008 a 2015. Los parámetros microbiológicos no fueron considerados, ya que permanecieron en un valor fijo de cero, es decir, no hubo presencia de coliformes totales y *Escherichia coli* en ninguna de las muestras estudiadas.

El parámetro químico de hierro tampoco fue tenido en cuenta, debido a que presenta muchos valores perdidos y al imputar los datos ausentes por los promedios anuales los estadísticos descriptivos y los diagramas quedarían probablemente muy distorsionados, dando la impresión de aparente estabilidad del fenómeno, cuando esto posiblemente no es así.

#### 4.2.1 Cloro Residual

En las Figura 2 y Figura 3 se presentan los diagramas de caja y bigotes anuales y la serie de tiempo respectivamente. A partir de la información, se puede observar que las medias anuales oscilan entre 0,86 y 0,96 mg/L, lo cual se encuentra dentro de los valores aceptables (0,3-2 mg/l)<sup>1</sup>, además que los mínimos y máximos de cada año se ubican dentro de ese rango.

Es notable un ciclo de 5 años, en el cual los valores del cloro aumentan lentamente los primeros 3 años (2008 a 2010) y se produce una elevación considerable en el cuarto año (2011), para luego disminuir rápidamente en el quinto año (2012). También se observa un lento aumento en los años 2013 a 2015 (similar al del 2008 al 2010). En el año del mayor incremento (2011), el año anterior (2010) y el siguiente (2012), la dispersión disminuye (lo cual puede observarse en los valores del rango intercuartilar).

---

<sup>1</sup> Resolución No. 2115 de 2007.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

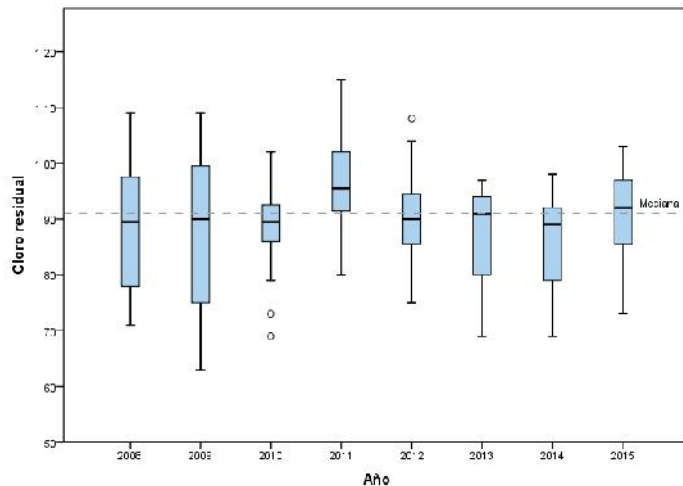


Figura 2: Diagramas de caja-bigotes anuales del Cloro residual (mg/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

Fuente: Elaboración propia.

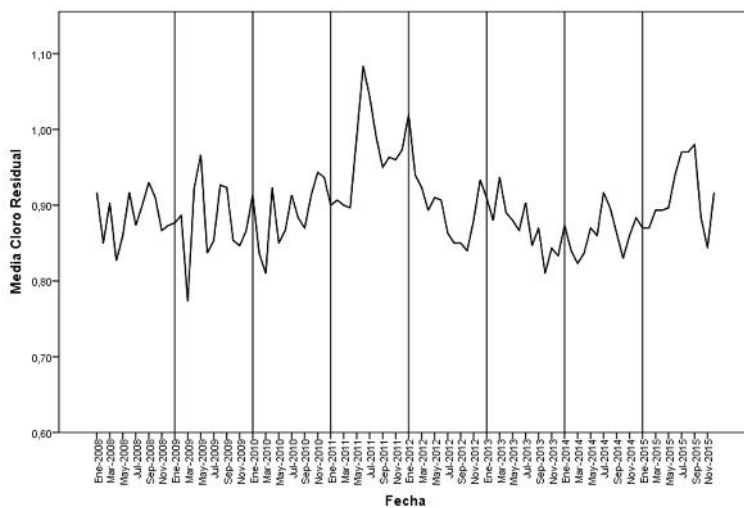


Figura 3: Serie de tiempo del cloro residual (mg/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

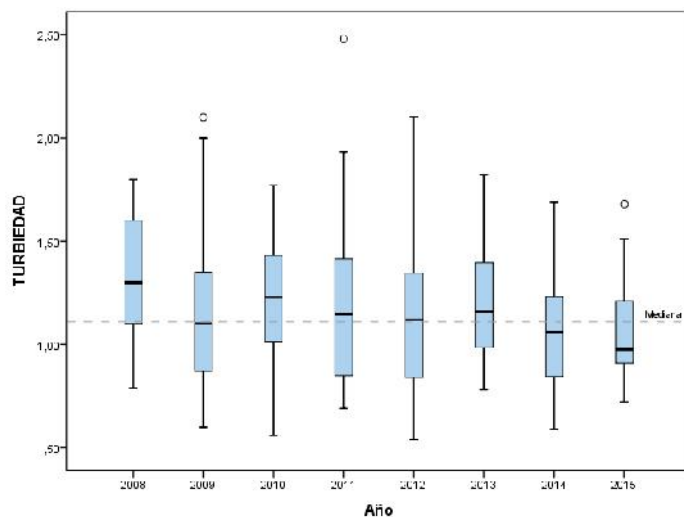
Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.2 Turbiedad

Con respecto a la Turbiedad (UNT) se muestran los diagramas de caja y bigotes anuales (Figura 4) y la serie de tiempo (Figura 5).

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

Se observa un patrón anual relativamente estable, con un decremento en los últimos dos años (2014 y 2015). Además, la dispersión de la Turbiedad presenta variaciones entre los años estudiados, ocurriendo un aumento (no perfecto) del 2008 a 2011 y luego una disminución hasta llegar a su punto mínimo en el 2015. Durante los años que presentan mayor dispersión en los datos (2009, 2011 y 2012) coincide que, en algunos meses, la Turbiedad sobrepasó los límites admisibles (2 UNT).



*Figura 4: Diagramas de caja-bigotes anuales de la turbiedad (UNT) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.*

Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.3 Color Aparente

Respecto al Color Aparente (UPC) se muestran los diagramas de caja y bigotes anuales (Figura 6) y la serie de tiempo (Figura 7), apreciándose una tendencia anual claramente lineal, un aumento del 2009 a 2012 y disminución del 2013 a 2015 (el decremento del 2008 parece ser el final de un ciclo pasado). La dispersión, evaluada a través de la desviación estándar, tiene un ciclo similar, en el cual hubo una disminución del 2008 al 2009, luego un aumento progresivo del 2009 al 2011, seguido de un decremento del 2012 al 2015.

# EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

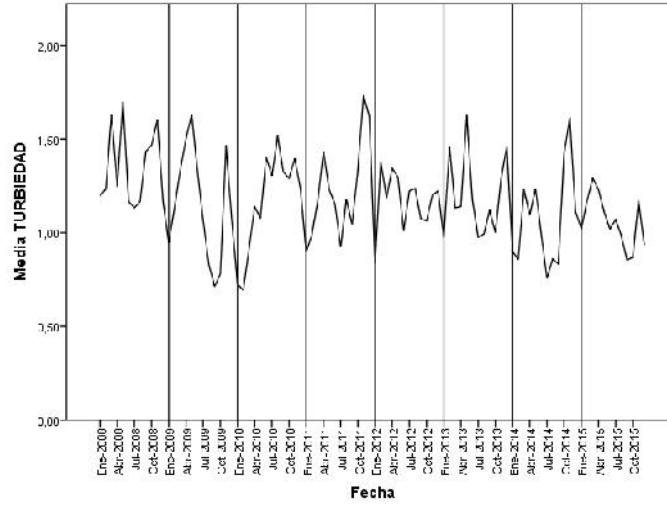


Figura 5: Serie de tiempo de la turbiedad (UNT) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

Fuente: Elaboración propia.

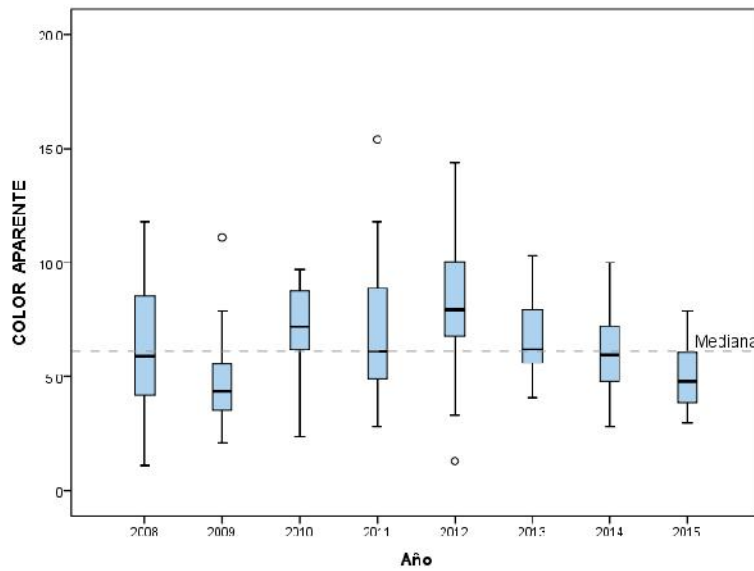
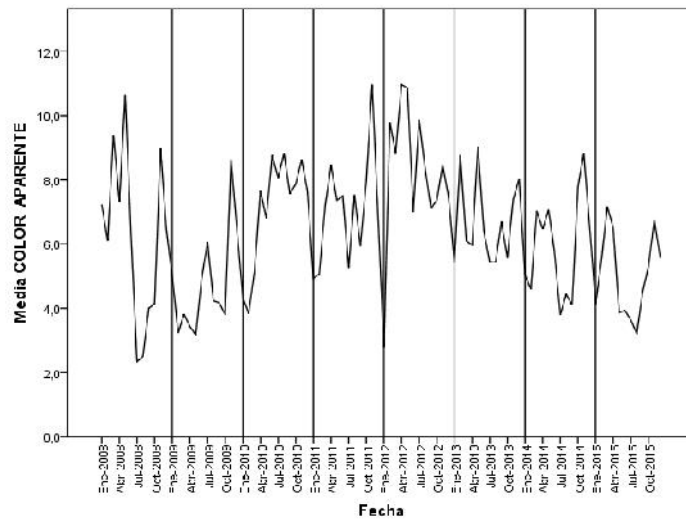


Figura 6: Diagramas de caja-bigotes anuales del color aparente (UPC) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

Fuente: Elaboración propia

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA



*Figura 7: Serie de tiempo del color aparente (UPC) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.*

Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.4 pH

Con respecto al pH se muestran los diagramas de caja y bigotes anuales (Figura 8) y la serie de tiempo (Figura 9). Se aprecia un aumento tenue en las medias a través de los años de estudio, exceptuando enero de 2010, el cual presentó un aumento más intenso que los demás meses. La dispersión no presenta patrones claros durante este periodo de tiempo.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

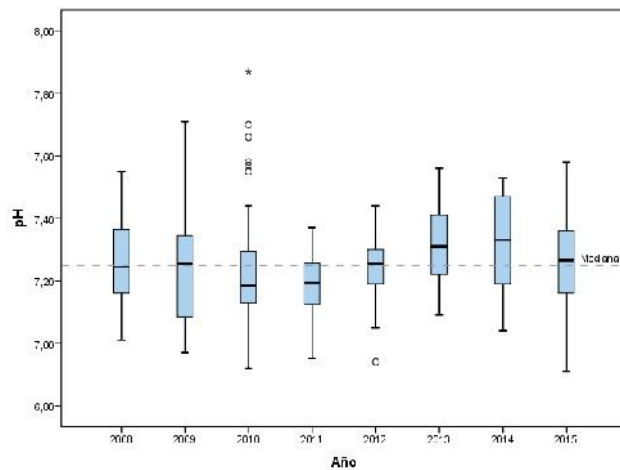


Figura 8: Diagramas de caja-bigotes anuales del pH (Unidades pH) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

Fuente: Elaboración propia.

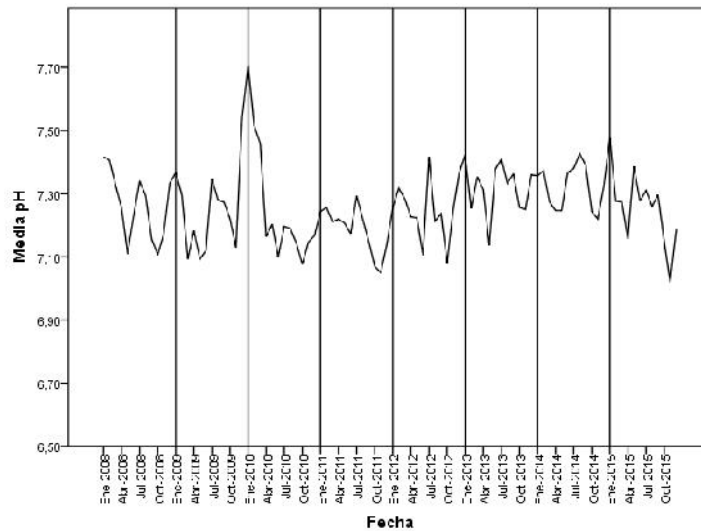


Figura 9: Serie de tiempo del pH (Unidades pH) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

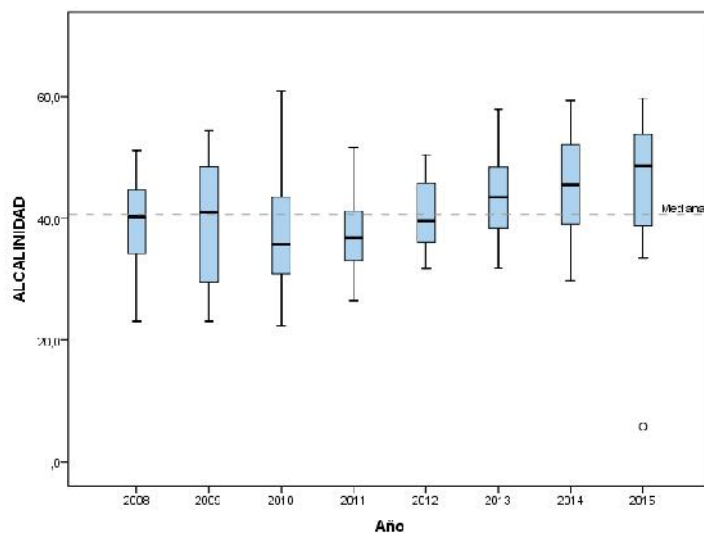
Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.5 Alcalinidad

En relación con la Alcalinidad (mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ ), se muestran los diagramas de caja y bigotes anuales (Figura 10) y la serie de tiempo (Figura 11); pudiéndose apreciar un

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

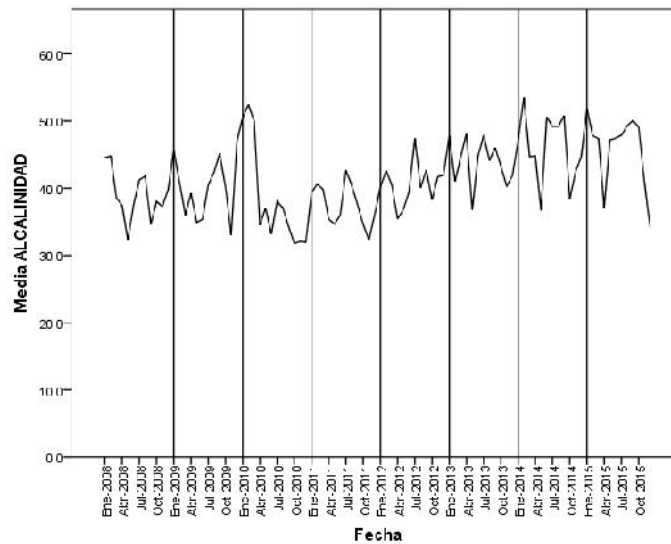
incremento progresivo de la misma a través de los años de estudio, sin llegar, en ningún caso, a sobrepasar los límites aceptables en la Resolución 2115 d 2007 (máximo 200 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ ); sin embargo, es de especial importancia estar alerta a su incremento, debido a esta tendencia creciente. La dispersión evaluada a través de la desviación estándar presenta aumentos y decrementos cíclicos, en concreto: del 2008 a 2010 aumenta, disminuye del 2011 a 2012 y aumenta nuevamente del 2013 a 2015.



*Figura 10: Diagramas de caja-bigotes anuales de la alcalinidad (mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ ) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.*

Fuente: Elaboración propia.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA



*Figura 11: Serie de tiempo de la alcalinidad (mg CaCO<sub>3</sub>/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.*

Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.6 Dureza

En cuanto a la Dureza (mg CaCO<sub>3</sub>/l), se muestran los diagramas de caja y bigotes anuales (Figura 12) y la serie de tiempo (Figura 13). La tendencia es estacionaria en los primeros 3 años (2008 a 2010), presentándose luego un incremento progresivo desde el 2011 al 2013 (2 años), para después mantenerse nuevamente estacionario del 2013 a 2015, en un nivel superior al inicial.

# EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

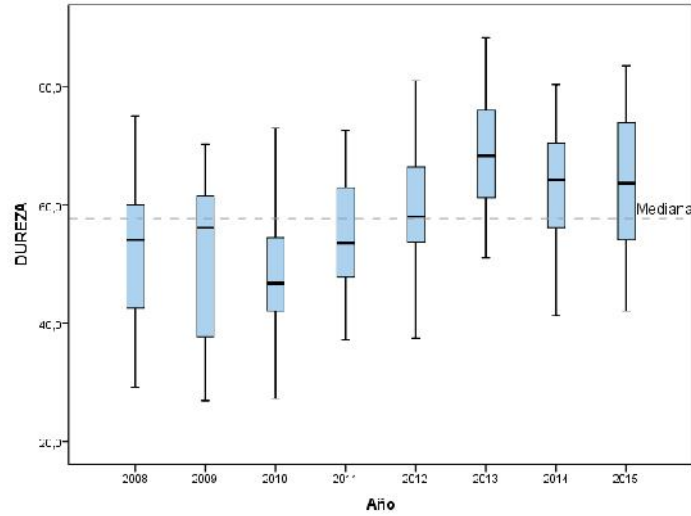


Figura 12: Diagramas de caja-bigotes anuales de la dureza (mg CaCO<sub>3</sub>/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

Fuente: Elaboración propia.

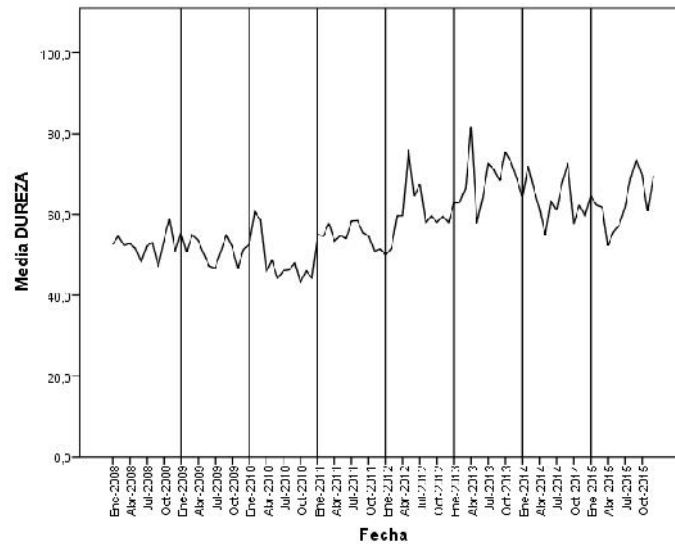


Figura 13: Serie de tiempo de la dureza (mg CaCO<sub>3</sub>/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.7 Cloruros

Respecto a los Cloruros (mg Cl/l) se muestran los diagramas de caja y bigotes anuales (Figura 14) y la serie de tiempo (Figura 15); observándose una clara tendencia lineal creciente a través de los años estudiados (2008 al 2015). No obstante, se mantienen muy por debajo del límite aceptable (250 mg/l).

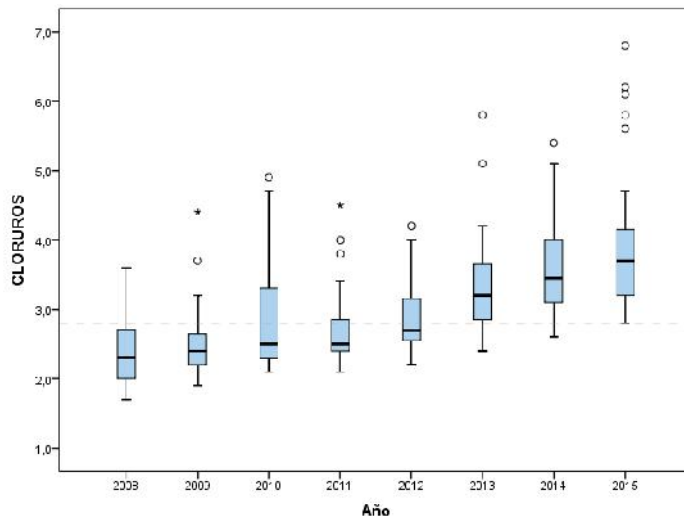


Figura 14: Diagramas de caja-bigotes anuales de los cloruros (mg Cl/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.8 Sulfatos

Referente a los Sulfatos (mg SO<sub>4</sub>/l), se exponen los diagramas de caja y bigotes anuales (Figura 16) y la serie de tiempo (Figura 17). El patrón que se da en cuanto a los Sulfatos es de un crecimiento lento general, con tres años intercalados (2009, 2012 y 2015), en los cuales hay una ligera disminución. La dispersión no presenta un patrón claro.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

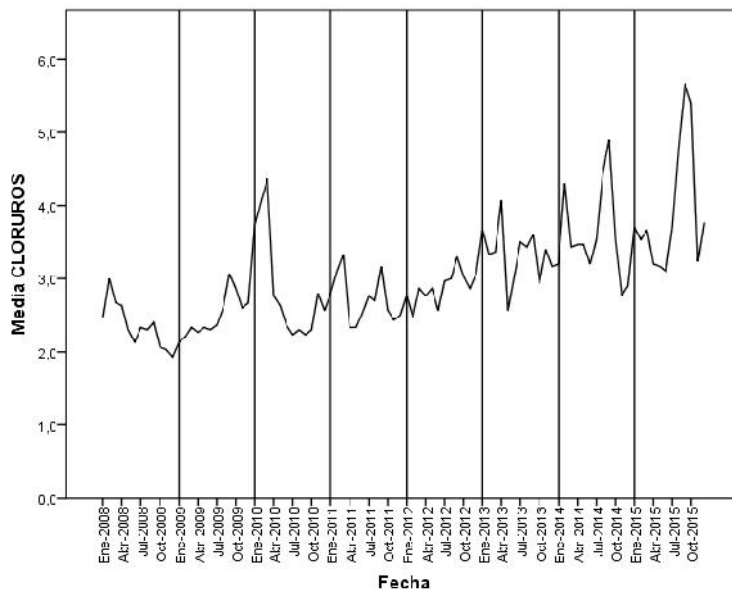


Figura 15: Serie de tiempo de los cloruros (mg Cl/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

Fuente: Elaboración propia.

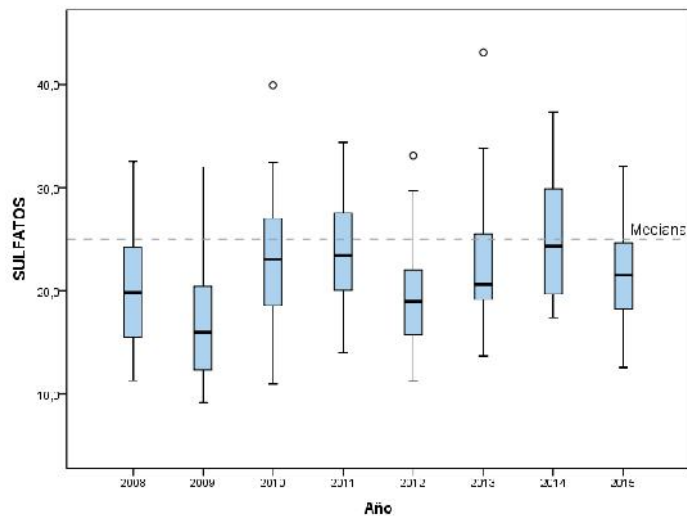
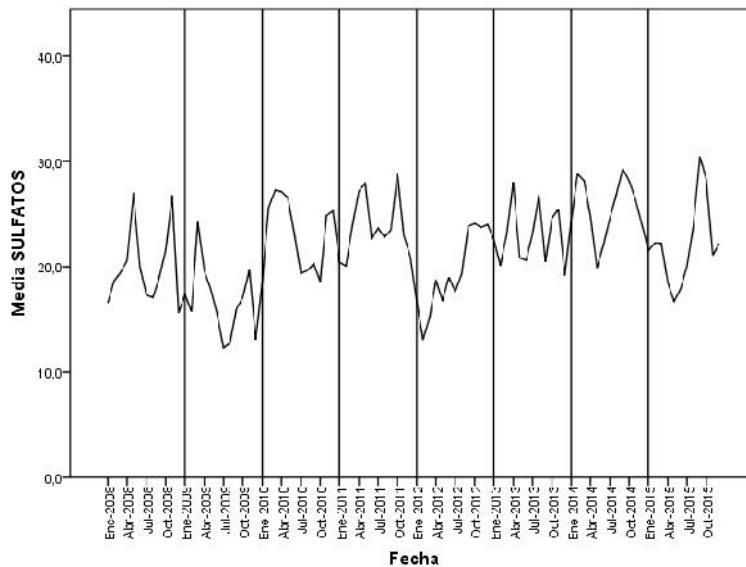


Figura 16: Diagramas de caja-bigotes anuales de los sulfatos (mg SO<sub>4</sub>/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

Fuente: Elaboración propia.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA



*Figura 17: Serie de tiempo de los sulfatos (mg SO<sub>4</sub>/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.*

Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.9 Nitratos

Concerniente a los Nitratos (mg/l), se muestran los diagramas de caja y bigotes anuales (Figura 18) y la serie de tiempo (Figura 19). De acuerdo con los datos señalados, éstos presentan una tendencia a la disminución a través de los años de estudio, registrándose en los años 2010 y 2015 periodos de especial disminución. Por otro lado, la dispersión es similar en todos los años estudiados, exceptuando el 2009 y 2010, en los cuales es más pronunciada.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

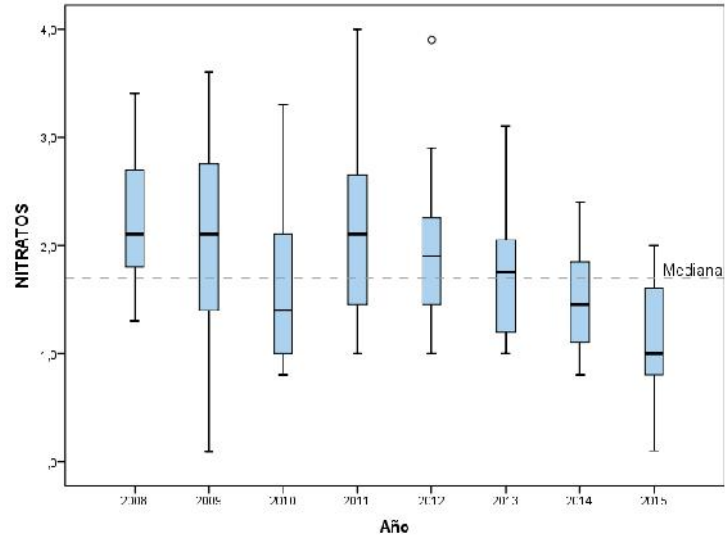


Figura 18: Diagramas de caja-bigotes anuales de los nitratos (mg/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

Fuente: Elaboración propia.

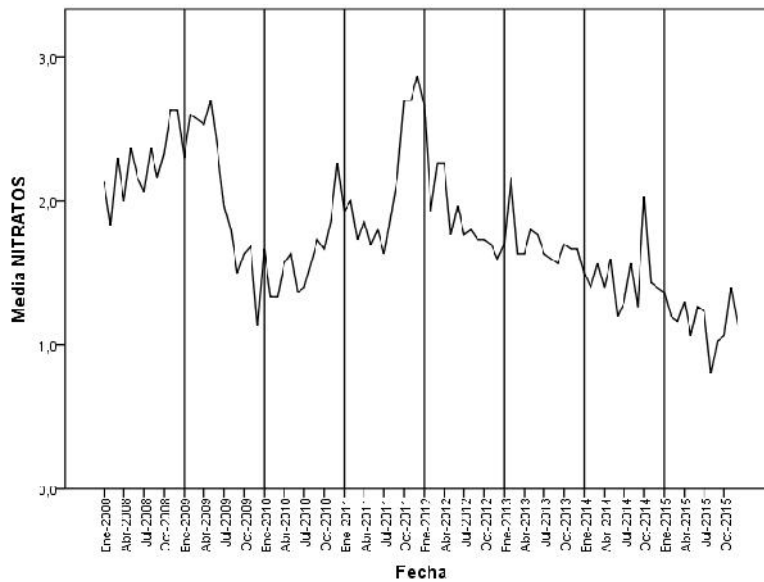
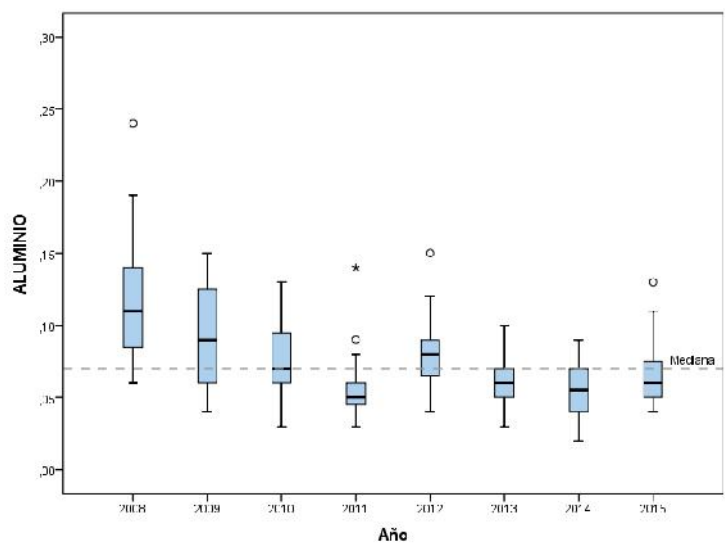


Figura 19: Serie de tiempo de los nitratos (mg/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

Fuente: Elaboración propia.

**4.2.10 Aluminio**

Con respecto a la concentración de Aluminio (mg Al/l), se muestran los diagramas de caja y bigotes anuales (Figura 20) y la serie de tiempo (Figura 21). Según los datos expuestos, éste presenta una tendencia a la disminución durante todos los años analizados; es de notar que en el año 2011 se presentó el decremento más pronunciado de todo el período. En cuanto a la dispersión puede afirmarse que es mayor en los años 2008 a 2010 disminuyendo durante los años posteriores.



*Figura 20: Diagramas de caja-bigotes anuales de la concentración de aluminio (mg Al/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.*

Fuente: Elaboración propia.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

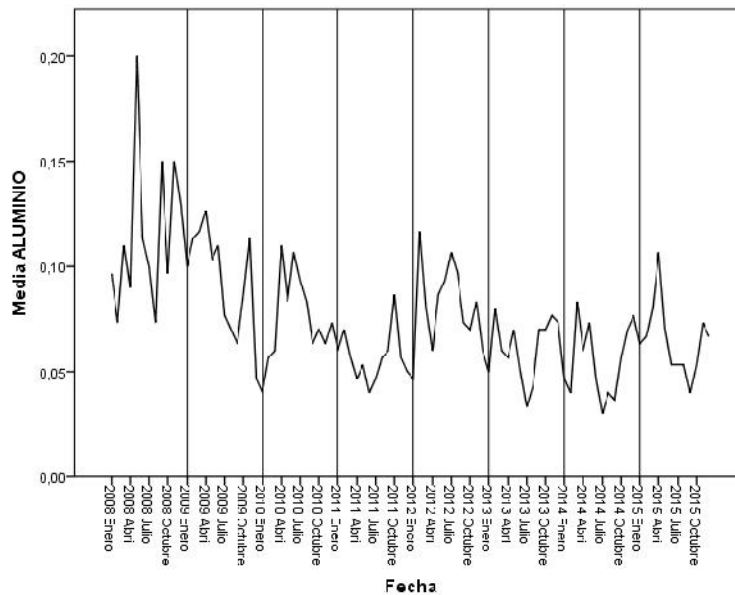


Figura 21: Serie de tiempo de la concentración de aluminio (mg Al/l) en el agua para consumo humano de la muestra recolectada en Bucaramanga, Floridablanca y Girón.

Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, la Alcalinidad y los Cloruros han aumentado progresivamente durante los años de estudio, mientras que los Nitratos han presentado una disminución constante a partir del año 2011. La Turbiedad es el único parámetro que, en algunos meses, ha sobrepasado el valor máximo permisible (2UNT) reportado en la Resolución No. 2115 de 2007. Los demás parámetros no registran un comportamiento definido.

### 4.3 Incidencia de la Variabilidad Climática Estacional e Interanual en el Cálculo del IRCA

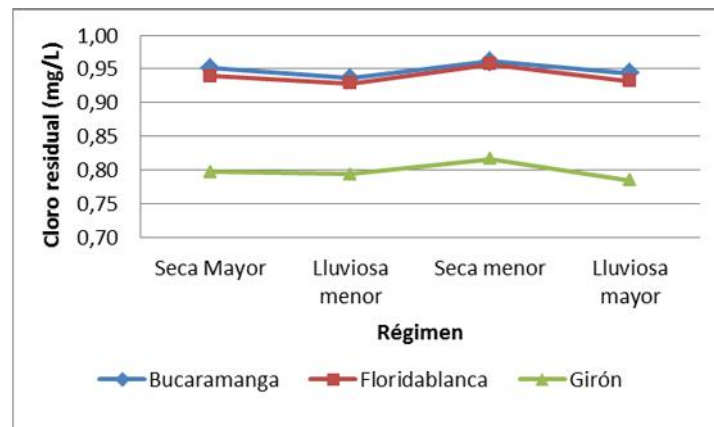
#### 4.3.1 Variabilidad Climática Estacional

El comportamiento anual de precipitación de la subcuenca del Río Suratá, obedece, como es característico de la región Andina, a un régimen bimodal con dos períodos lluviosos y dos de sequía intercalados, por lo que, para determinar la influencia de los regímenes: seca

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

mayor (diciembre a febrero), lluviosa menor (marzo a mayo), seca menor (junio a agosto) y lluviosa mayor (septiembre a noviembre) en el cálculo del IRCA, se estimaron los valores medios por trimestres de los parámetros fisicoquímicos y del IRCA en cada una de las áreas de estudio.

El comportamiento del Cloro residual (Figura 22) mostró un reducido aumento durante los periodos secos, lo que indica una influencia inversa de la concentración de cloro con el régimen de lluvias, es decir, que entre más precipitaciones se presentan menor es el nivel de Cloro residual en la red de distribución.



*Figura 22: Variabilidad climática estacional del cloro residual en las diferentes zonas de estudio.*

Fuente: Elaboración propia.

Las Figura 23 y Figura 24 muestran que la Turbiedad y el color aparente son altos en los periodos lluviosos, es decir, existe un aumento en sus concentraciones por influencia directa de las épocas de lluvia.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

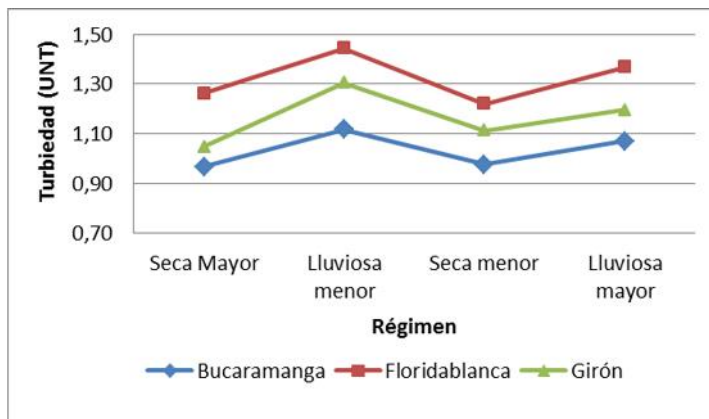


Figura 23: Variabilidad climática estacional de la turbiedad en las diferentes zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

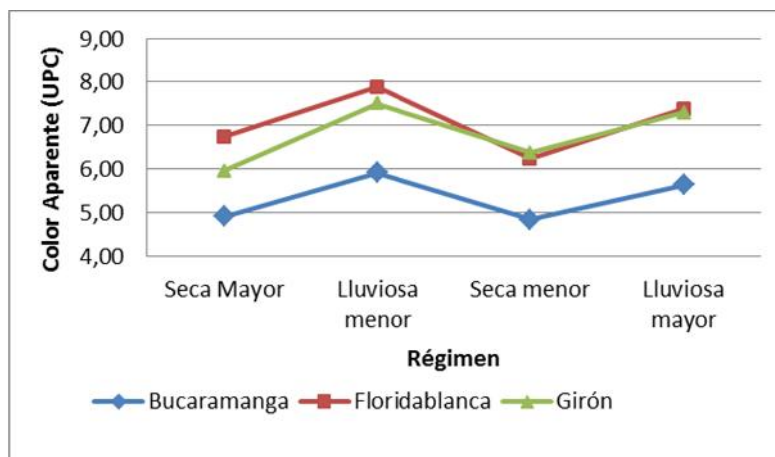


Figura 24: Variabilidad climática estacional del color aparente en las diferentes zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En las tres zonas de estudio, el pH es más alcalino durante los regímenes de sequía (Figura 25). Por lo tanto, se refleja una relación inversa del pH con la temporada de lluvias.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

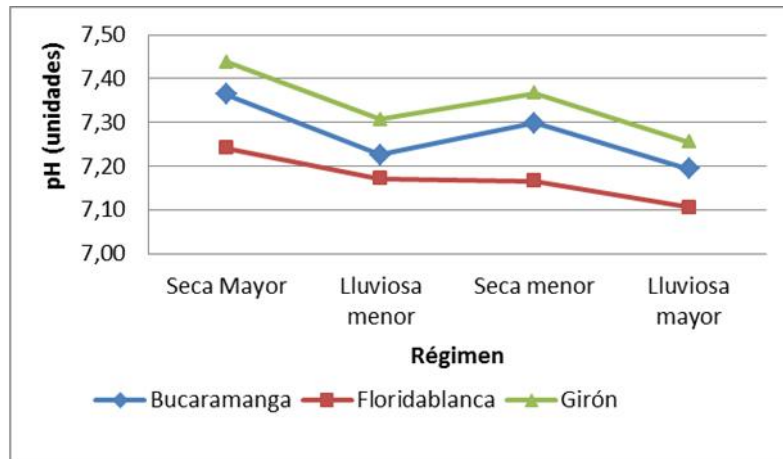


Figura 25: Variabilidad climática estacional del pH en las diferentes zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

La alcalinidad (Figura 26) presentó mayores concentraciones durante los períodos secos, y, al igual que el pH, manifiesta una asociación inversa con el aumento de las precipitaciones.

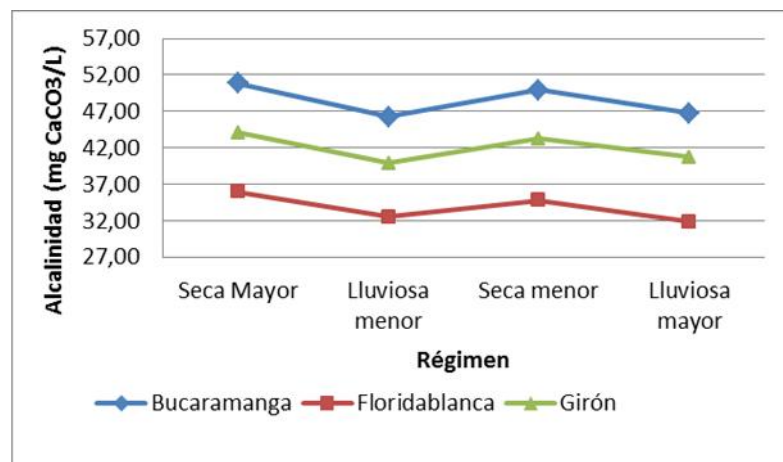


Figura 26: Variabilidad climática estacional de la alcalinidad en las diferentes zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Figura 27 se observa que la dureza registró su nivel más alto en el régimen seca menor y el más bajo en la seca mayor (a excepción del municipio de Girón), por

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

lo que se pudo establecer que no existe relación entre la concentración de la dureza y la variabilidad climática estacional.

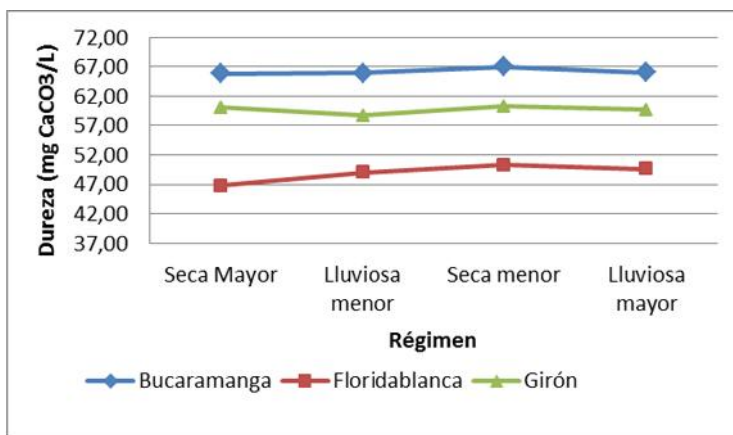


Figura 27: Variabilidad climática estacional de la dureza en las diferentes zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 28 se deduce que los niveles más altos de Aluminio se muestran en los periodos de lluvia y los más bajos en los regímenes de sequía (con la misma concentración tanto en la mayor como en la menor), indicando que existe una relación directa entre las épocas de lluvia y la concentración de este parámetro.

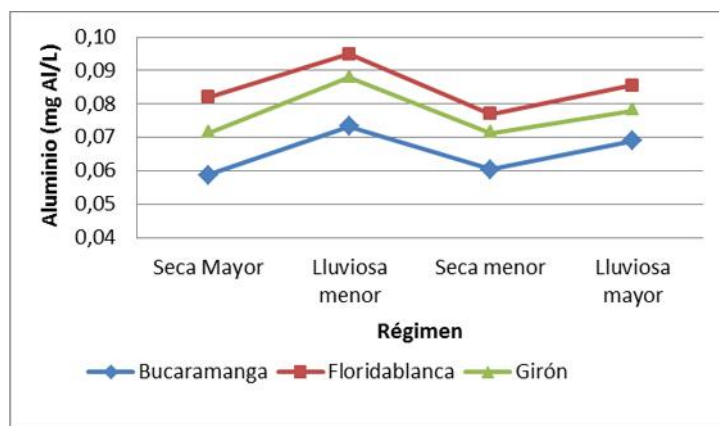


Figura 28 Variabilidad climática estacional del aluminio en las diferentes zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

En la Figura 29 se puede observar que los niveles más altos de Cloruros se dan en el periodo seca mayor y lluviosa mayor, por lo tanto, no se evidencia una clara relación entre el aumento o disminución de la concentración de este parámetro con el régimen bimodal de precipitaciones

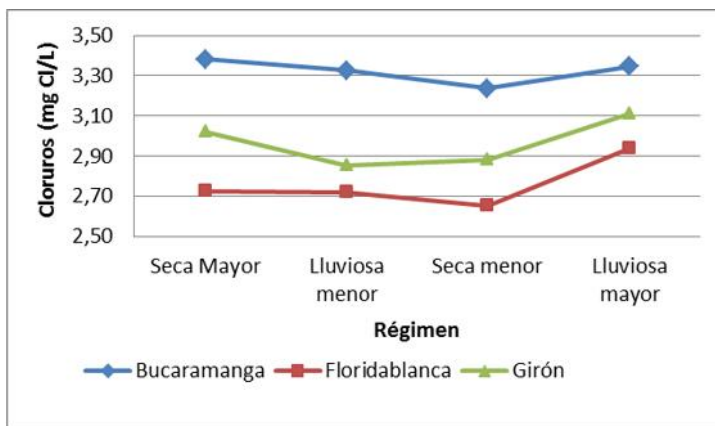


Figura 29: Variabilidad climática estacional de cloruros en las diferentes zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 30 se muestra que la mayor concentración de Sulfatos se presenta durante el régimen de lluvias y la menor durante el de sequía. Por lo tanto, existe una influencia directa entre las precipitaciones y el aumento de los Sulfatos.

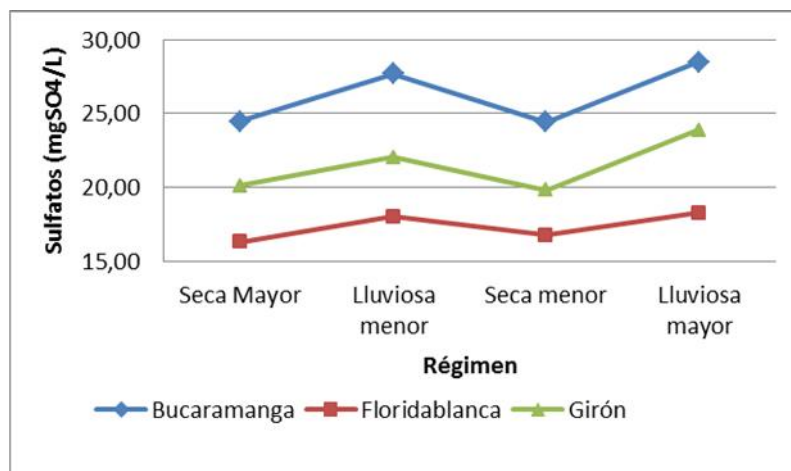


Figura 30: Variabilidad climática estacional de sulfatos en las diferentes zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

La Figura 31 indica que los valores de Nitratos son más altos en el periodo seco mayor y lluvioso menor, por lo que tampoco se puede asociar dicho parámetro con la Variabilidad climática estacional.

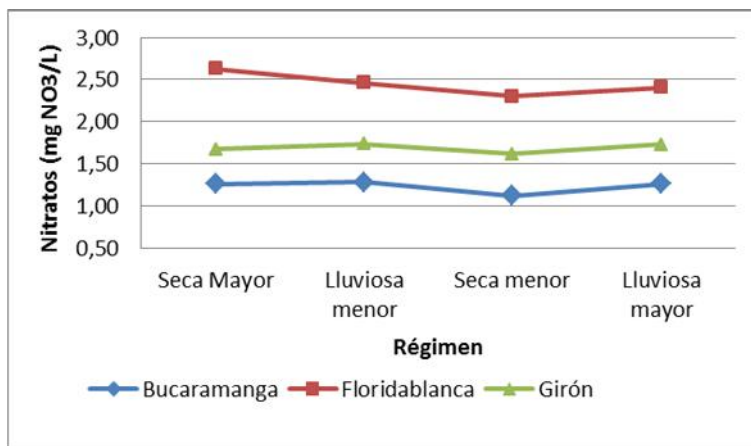


Figura 31: Variabilidad climática estacional de nitratos en las diferentes zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Figura 32 se observa que el IRCA es más alto en los períodos lluviosos, lo que puede estar relacionado con los valores de Turbiedad que estuvieron por encima del máximo permitido (2 UNT) y que se registraron en algunos meses de lluvia.

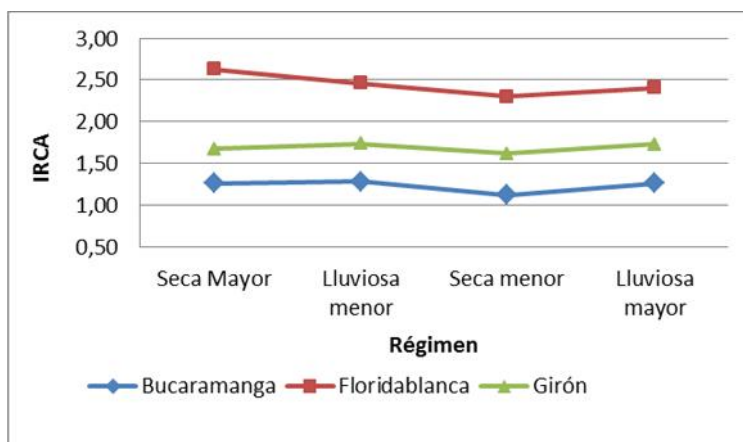


Figura 32: Variabilidad climática estacional del IRCA en las diferentes zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

En conclusión, la variabilidad climática estacional incide en los parámetros de turbiedad, color aparente, aluminio, sulfatos y en el mismo IRCA, aumentando sus concentraciones durante la época de lluvias, y en los parámetros de cloro residual, pH y alcalinidad, incrementando su concentración en los regímenes de sequía. Dureza, nitratos y cloruros no mostraron un comportamiento influenciado por el régimen bimodal de lluvias característico de la zona de estudio.

### 4.3.2 Variabilidad Climática Interanual

Teniendo en cuenta el intervalo del método de correlación, que oscila entre  $-1$   $r$   $1$ , la correlación se puede clasificar en fuerte, moderada, débil o ninguna, como se muestra en la Tabla 9 (Amoakoa & Prasad, 2014 citado en Alfaro & Flórez, 2015). Así, bajo la consideración de que el análisis efectuado presenta un nivel de significancia de 0,05, se observa, a partir de la Tabla 10, que no hay correlación entre el IRCA mensual y el ONI, ya que la significación es mayor de 0,05 (Sig. = 0,191), es decir, la variación del índice no aumenta ni disminuye los valores del IRCA. La misma situación la presentan los parámetros de Hierro, Sulfatos, Aluminio, Cloro residual, Turbiedad y Color Aparente.

Tabla 9: *Clasificación de los coeficientes de correlación de Pearson.*

Correlación	Coeficiente de correlación de Pearson
Fuerte	1 $R > 0,5$
Moderada	0,5 $R > 0,3$
Débil	0,3 $R > 0,1$
Ninguna	0,1 $R > 0$

---

Fuente: Alfaro & Flórez (2015)

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

Por otro lado, en la Tabla 10 se aprecian las correlaciones, realizadas mediante el método de Pearson, entre el IRCA y los parámetros fisicoquímicos usados para su determinación con el Índice Oceánico del Niño (ONI por sus iniciales en inglés) medido mensualmente durante el periodo 2008 - 2015.

*Tabla 10: Correlaciones de los parámetros fisicoquímicos usados en el cálculo del IRCA y del IRCA en sí mismo con el Índice Oceánico del Niño (ONI) medido (mensualmente) en los años 2008 al 2015.*

<b>Parámetros e IRCA</b>	<b>Correlación con ONI</b>	<b>Sig. (Bilateral)</b>
Nitratos	-0,509	0,000
Alcalinidad	0,463	0,000
Cloruros	0,415	0,000
Dureza	0,326	0,001
pH	0,307	0,002
IRCA mensual	0,135	0,191
Hierro	0,056	0,591
Cloro residual	-0,005	0,961
Aluminio	-0,052	0,616
Sulfatos	-0,063	0,541
Color aparente	-0,134	0,194
Turbiedad	-0,171	0,096

Fuente: Elaboración propia.

En general, los parámetros que efectivamente se asocian directamente con el ONI (ordenados de forma descendente) son: Nitratos, Alcalinidad, Cloruros, Dureza y pH. Igualmente, los Nitratos presentan una correlación negativa y fuerte, y los demás parámetros muestran una correlación positiva y moderada.

### **4.4 Modelo Matemático Propuesto para el Cálculo del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano en Bucaramanga, Floridablanca y Girón**

El método matemático de cálculo del índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano (IRCA) propuesto a continuación, busca establecer una única ecuación de cálculo, que no sea afectada por posibles errores humanos, al eliminar la asignación de valores de puntaje de riesgo que debe realizar la persona que ejecuta el cálculo, descrita en la resolución 2115 de 2007, en donde existen puntajes de riesgo para las variables fisicoquímicas y microbiológicas si la variable excede valores límite.

Inicialmente se buscó modelar el comportamiento de la variable IRCA en función de las variables fisicoquímicas y microbiológicas utilizando modelos matemáticos lineales en donde se emplearon todas las variables o grupos de éstas, pero en los modelos planteados la diferencia entre los valores aceptados como correctos (calculados según la metodología de la Resolución No. 2115 de 2007), y los valores simulados es muy alta, obteniéndose porcentajes de error superiores al 60%.

Posteriormente, se utilizaron modelos matemáticos no lineales, disminuyendo con éstos los porcentajes de error entre el valor simulado y el valor aceptado como correcto (porcentajes de error del 40% aproximadamente) pero que no son satisfactorios debido al uso que se le da a estos valores por parte de los organismos de regulación de la calidad de agua, a continuación se planteó un modelo basado en la función escalón unitario, que se utiliza en el modelamiento de sistemas mecánicos o eléctricos que implican funciones con discontinuidades, correspondientes a fuerzas externas que se activan o desactivan de manera abrupta, pero este fue descartado debido a que introduce nuevamente el factor de decisión del valor de puntaje de riesgo por parte de la persona que realiza el cálculo de IRCA.

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

Finalmente, se propone un modelo matemático basado en la función logística, curva logística o curva en forma de s, función constituye un refinamiento del modelo exponencial y es descrita por la siguiente ecuación:

$$f(q) = \frac{P_r}{1 + e^{-fq}}$$

Las ecuaciones de cálculo y nomenclatura asignadas a los parámetros físicos, químicos y/o microbiológicos utilizados en el cálculo de IRCA se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11: *Nomenclatura y ecuación asignada a cada parámetro para el cálculo del IRCA.*

Parámetros	Nomenclatura	Unidades	Ecuación
Color aparente	Ca	Upc	$PCa = \left( \frac{6}{1 + 100^{149-100Ca}} \right)$
Turbiedad	Tu	Unt	$PTu = \left( \frac{5}{1 + 100^{199-100T}} \right)$
pH	pH	Unidades pH	$PPH = 1,5 - \left( \frac{1,5}{1 + 100^{\frac{6499-1000pH}{pH}}} \right)$
Cloro residual libre	Cl	mg/l	$PCL = 15 - \left( \frac{5}{1 + 100^{30-100Cl}} \right)$
Alcalinidad total	A	mg CaCO <sub>3</sub> /l	$PA = \left( \frac{15}{1 + 100^{19,4-0,1A}} \right)$
Dureza total	D	mg Ca/l	$PD = \left( \frac{1}{1 + 100^{29,5-0,1D}} \right)$
Sulfatos	S	mg/l	$PS = \left( \frac{1}{1 + 100^{200^{24,8-0,1S}}} \right)$
Hierro Total	Fe	mg/l	$PFe = \left( \frac{1,5}{1 + 100^{29,9-100Fe}} \right)$
Cloruros	Cl <sub>s</sub>	mg/l	$PCLs = \left( \frac{1}{1 + 1000^{24,8-0,1Cl_s}} \right)$
Nitratos	Na	mg/l	$PNa = \left( \frac{1}{1 + 100^{99,7-10Na}} \right)$
Nitritos	Ni	mg/l	$PNi = \left( \frac{3}{1 + 100^{99,9-1000Ni}} \right)$

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

Parámetros	Nomenclatura	Unidades	Ecuación
Aluminio	Al	mg Cl/l	$PAI = \left( \frac{3}{1 + 100^{19,9-100Al}} \right)$
Coliformes totales	Ct	Ufc/100ml	$PCt = \left( \frac{15}{1 + 100^{9,9-100Ct}} \right)$
<i>Escherichia Coli</i>	Ecoli	Ufc/100ml	$PEcoli = \left( \frac{25}{1 + 100^{9,9-100Ecoli}} \right)$

Fuente: Elaboración propia

El IRCA se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$IRCA = \frac{\sum_{i=1}^n P_{f_{q(i)}}}{80} \times 100\%$$

$$P_{f_{q(i)}} = \frac{q - 1}{80} \times 100$$

*q = Ca, Turb, PH, ...*

A partir del valor del IRCA calculado, se determina el nivel de riesgo de acuerdo a lo registrado en la Tabla 3, con este modelo matemático el porcentaje de error entre el valor IRCA calculado utilizando el método de la Resolución No. 2115 de 2007 y el método de la función logística es igual a cero, encontrándose diferencias entre estos dos valores a partir de las treceava cifra decimal., como se puede observar en la Tabla 12 que se presenta a continuación.

Tabla 12: Comparación entre los valores de riesgo asignados según la Resolución No. 2115 de 2007 y el valor de riesgo calculado con el modelo matemático propuesto para cada parámetro en el cálculo del IRCA.

Parámetro	Valor medido	Valor del Riesgo asignado	Valor del Riesgo calculado con modelo matemático propuesto
Cloro residual	0,93	0	0
Turbiedad	1,1	0	$1,5 \times 10^{-177}$
Color aparente	4,6	0	$6 \times 10^{-206}$
pH	7,29	0	0

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

Parámetro	Valor medido	Valor del Riesgo asignado	Valor del Riesgo calculado con modelo matemático propuesto
Aluminio	0,06	0	$4,75468 \times 10^{-28}$
Alcalinidad	50,3	0	$7,76247 \times 10^{-44}$
Dureza	66,4	0	$2,63027 \times 10^{-69}$
Cloruros	3,6	0	$6,3096 \times 10^{-123}$
Sulfatos	24,8	0	$2,5119 \times 10^{-112}$
Hierro	0,07	0	$2,37734 \times 10^{-46}$
Nitratos	1,3	0	$7,9433 \times 10^{-261}$
Nitritos	0	0	$\times 10^{-198}$
Coliformes totales	0	0	$2,37734 \times 10^{-19}$
<i>Escherichia Coli</i>	0	0	$3,96223 \times 10^{-19}$
IRCA	No Aplica	0	$7,12312 \times 10^{-19}$

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se puede concluir que el cambio del modelo de cálculo, de una metodología en donde el personal que realiza el cálculo escoge entre dos posibles valores, por un método matemático del tipo función logística, en donde se introducen los valores de las variables medidas a una serie de ecuaciones matemáticas y este reporta un único valor de IRCA, elimina la posibilidad de errores en la determinación de la calidad de agua para consumo humano sin disminuir con esto la exactitud del método.

### 5. Discusión

A partir de los datos reportados durante los últimos ocho años, por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. para los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón, se realizó un análisis quimiométrico de las variables usadas en el cálculo del IRCA y de éste modo se determinó cuáles de éstos parámetros generan mayor impacto en el mismo. Es de resaltar que los parámetros microbiológicos, coliformes totales y *Escherichia Coli*, no estuvieron presentes en ninguna de las muestras estudiadas, lo que significa que la etapa de desinfección, llevada a cabo por el acueducto garantiza la ausencia de microorganismos que afectan la salud de los consumidores. Los Nitratos y el Cloro residual diferencian a las muestras en las distintas zonas de estudio de una mayor forma que el resto de los parámetros ya que presentan un eta cuadrado ( $r^2$ ) del 51 y 50%, respectivamente.

Las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos evaluados mostraron patrones diferentes en el agua de las distintas zonas y para explicar dicha diferencia es importante resaltar que el sistema de producción de agua potable para el triángulo Bucaramanga-Floridablanca-Girón está conformado por las plantas de tratamiento: Morrорrico y La Flora (del sistema Río Tona), Bosconia (del sistema Río Suratá) y Floridablanca (del sistema Río Frío) (Amb, 2016).

El hecho de que Bucaramanga presente mayor Alcalinidad se debe a que el agua que abastece este municipio proviene del Río Tona y del Río Suratá, ambos pertenecientes a la subcuenca del Río Suratá; dentro de ésta afloran rocas sedimentarias como las calizas (CDMB, 2006), las cuales al disolverse en el agua, por la presencia del  $\text{CO}_2$ , liberan carbonatos, forma

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

química de mayor contribución a la Alcalinidad. (“Parámetros físico-químicos: alcalinidad,” s.f.).

Las medias de Alcalinidad y Dureza, para las tres zonas de procedencia del agua, mantienen una relación directa, lo que se atribuye a que las piedras calizas frecuentemente no sólo contienen carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), el cual contribuye también a la Dureza, sino que, además, presentan, en menor cantidad, magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ), mineral que al disociarse origina el catión metálico Mg y el carbonato de magnesio, cuyas concentraciones aportan a la determinación de la Dureza del agua (Valenzuela, 2004).

El contenido de Sulfatos en las muestras de Bucaramanga también es mayor, situación que corrobora que la Dureza del agua es, además, determinada por la presencia de esta sal. (“Análisis de Dureza,” 1995) Una de las causas de la presencia de sulfato en el agua tratada, es la utilización del sulfato de Aluminio en el proceso de coagulación, el cual es llevado a cabo en las plantas de tratamiento de agua potable para eliminar las partículas coloidales, causantes de la Turbiedad y el Color Aparente (Andía, 2000), parámetros que son considerablemente mayores en el Río Suratá y Tona (AMB, 2014), por lo que las plantas que tratan sus agua utilizan mayor cantidad de coagulante. La presencia de Cloruros, al igual que la de Sulfatos, puede interpretarse como resultado del agregado de policloruro de aluminio, como coagulante, durante eventos de alta turbiedad (Andía, 2000).

El agua que abastece al municipio de Floridablanca proviene en su mayor parte del Río Frío y en menor cantidad del Río Tona (Amb, 2016), por lo que los altos valores de Turbiedad y de Color Aparente, en comparación con los otros dos municipios, pueden ser ocasionados por los continuos procesos de remoción en masa y deslizamientos que se presentan sobre el territorio de la microcuenca del Río Frío (CDMB, 2006). La presencia de Nitratos puede

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

atribuirse a las aguas excedentes de riegos agrícolas con cargas de fertilizantes y abonos nitrogenados (Rosas, 2001), situación que coincide con uno de los principales usos del suelo de la subcuenca (CDMB, 2006).

El agua que abastece el municipio de Girón es una mezcla del agua potabilizada en las cuatro plantas de tratamiento que conforman el acueducto Metropolitano de Bucaramanga, tres de ellas (Morrorrico, La Flora y Bosconia) están localizadas en Bucaramanga y la otra en el municipio de Floridablanca. A consecuencia de la distancia que separa las plantas de tratamiento de la red de distribución de Girón, se evidencia una disminución de la concentración del Cloro residual, ya que éste, se va consumiendo debido, por una parte, al consumo del cloro por la propia agua (sustancias presentes en ella y otras condiciones físicas) y por otra, al consumo que se produce en la interfase con las paredes de las conducciones (“Cloracion1,” 2005).

Al establecer las causas de la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos usados para calcular el IRCA se obtuvieron cuatro componentes principales que lograron la explicación del 72,39% de la varianza. El primer componente agrupa los parámetros químicos presentes en el agua en forma de iones, siendo éstos: La Dureza y dos de los iones que la conforman, Sulfatos y Cloruros (López, 1991); la Alcalinidad, que al igual que la Dureza (carbonatada) es generada, entre otros, por la contribución de sales de calcio y magnesio (Estanques.eu, s.f.); y los Nitratos que, aunque también son uno de los principales componentes de la Dureza (no carbonatada), registraron una carga negativa, lo que puede asociarse a que su presencia en el agua no está tan marcada por ser un componente natural como los anteriores, sino que ésta podría estar más influenciada por una acción antropogénica como lo es la recepción de aguas agrícolas

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

provenientes de sectores donde se utilizan abonos y fertilizantes (Rodríguez, Gauna, & Martínez, 2012).

El segundo componente principal contiene los parámetros físicos relacionados con la presencia de sedimentos como son el Color Aparente y la Turbiedad, parámetros que muestran una alta correlación, como lo demuestran los estudios de: Alfaro et al. (2013), Rodríguez & Cortés (2013) y Sanabria & Vásquez (2015); esto se debe a que el Color Aparente es causado por materia en suspensión y la Turbiedad es la reducción de la transparencia del agua ocasionada por el material participado en suspensión (Sanabria & Vásquez, 2015); el segundo componente también contiene Aluminio, cuya presencia podría atribuirse a que forma parte de los coagulantes utilizados en la potabilización del agua y cuya dosificación se incrementa en eventos donde aumenta la turbidez y, por ende, el Color Aparente.

El tercer componente principal representa la etapa final de desinfección, puesto que está conformado por el Cloro residual, indicador de dos aspectos fundamentales: Uno, demuestra que una suficiente cantidad de cloro fue añadida inicialmente al agua para inactivar las bacterias y algunos virus causantes de enfermedades diarreicas; y dos, que el agua se encuentra protegida de posibles recontaminaciones microbiológicas durante su almacenamiento o transferencia (Montesdeoca, s.f.). También hace parte del tercer componente el pH, el cual muestra una correlación negativa, lo que podría representar el hecho de que las reacciones químicas que se dan entre el cloro y el agua tienen una relación inversa con el pH, ya que cuanto más bajo es éste más alto es el porcentaje de ácido hipocloroso (HOCl) presente en el agua, el cual se ioniza posteriormente a iones de hipoclorito ( $\text{OCl}^-$ ). Cabe aclarar que la interacción resultante entre el cloro o sus productos de hidrólisis (HOCl o  $\text{OCl}^-$ ) con los microorganismos produce la desinfección (López, 1991).

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

El cuarto componente principal representa únicamente al Hierro, hecho que puede sustentarse en los resultados del estudio realizado por Rodríguez & Rodríguez (2015), donde se obtuvieron correlaciones fuertes entre éste elemento y parámetros químicos no evaluados en este proyecto tales como: Nitritos, Conductividad, Coliformes y Mesófilos, pero que llevan a la conclusión de que el Hierro es un parámetro potencial representativo de varias características del agua.

Al agrupar los parámetros fisicoquímicos (análisis clúster), usados en el cálculo del IRCA, se encontró una estructura similar a la obtenida en el análisis de componentes principales, sin embargo, es importante resaltar que los Nitratos y el pH que presentaron una correlación negativa en el ACP, en esta ocasión se agruparon con otros parámetros. El caso del pH, que forma un grupo con Alcalinidad, Dureza, Cloruros y Sulfatos, puede estar relacionado con la influencia que éste ejerce en el grado de disociación de los compuestos en disolución aumentando o disminuyendo la concentración de iones (Pérez, 2010); y en el caso de los Nitratos, que se agrupan con la Turbiedad, Color Aparente y Aluminio, puede estar asociado a la presencia de un conjunto de microorganismos suspendidos en el agua denominados plancton, los cuales contribuyen al Color Aparente y necesitan de una concentración alta de nutrientes como el nitrato para su desarrollo (“El cuadro ambiental del fitoplancton.” s.f.).

A partir del análisis de los datos históricos de los parámetros fisicoquímicos se evidencia que la Turbiedad es el único parámetro que, en algunos meses, ha sobrepasado el valor máximo permisible (2UNT), lo cual puede ser atribuido, como se mencionó anteriormente, al arrastre de sedimentos durante el recorrido del río hacia la bocatoma de la planta, en temporada de lluvias (Charry & Castellanos, 2016).

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

Las razones por las cuales la variabilidad climática estacional afecta algunos de los parámetros del IRCA se mencionan a continuación:

- En cuanto al comportamiento del Cloro residual, éste puede estar relacionado con el usual incremento de la cantidad de material orgánico en el agua de los Ríos Suratá y Tona, durante los meses de verano, requiriendo la aplicación de mayor dosis de cloro para el proceso de desinfección, en el pre tratamiento de las plantas Bosconia y La Flora, así como en la post cloración (AMB, 2014).
- La Turbiedad y el Color Aparente aumentan por el arrastre de sedimentos durante el trayecto del río hacia la bocatoma de la planta, en temporada de lluvias (Charry & Castellanos, 2016).
- El pH es más bajo durante la temporada de lluvias, puesto que éste usualmente disminuye al mezclarse con el agua lluvia, la cual es ligeramente ácida (J. Blanco, 2009).
- La disminución en la concentración de la Alcalinidad durante los periodos lluviosos, puede atribuirse al lavado del carbonato de calcio, el cual es altamente soluble (J. Blanco, 2009).
- Los niveles altos de Aluminio son algo común durante los meses lluviosos, ya que la calidad fisicoquímica del agua varia en su composición al presentar mayor cantidad de metales disueltos como el Aluminio entre otros (Andía, 2000). Otra razón, puede estar asociada al consumo de policloruro de aluminio ya que este coagulante se usa durante eventos de alta Turbiedad (AMB, 2014).

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

- El aumento de los Sulfatos, puede estar relacionado con el incremento de las dosis del coagulante, sulfato de aluminio, debido a los picos de Turbiedad en los ríos registrados en los meses lluviosos (Alfaro et al., 2015).
- El IRCA fue más alto durante los períodos lluviosos, debido a los valores de Turbiedad que estuvieron por encima del máximo permitido (2 UNT) en algunos meses de lluvia.

En cuanto al análisis de la variabilidad climática interanual entre el IRCA y los parámetros fisicoquímicos usados para su determinación con el Índice Oceánico del Niño (ONI) se encontró que hay disminución de los Nitratos al aumentar el promedio de la anomalía de la temperatura superficial del mar de tres meses consecutivos y viceversa, mientras que los parámetros de Alcalinidad, Cloruros, Dureza y pH aumentan o disminuyen sus concentraciones por influencia directa del evento ENSO. Los demás parámetros no presentaron ninguna relación.

Finalmente se propone un modelo matemático de cálculo del índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano (IRCA) basado en la función logística, curva logística o curva en forma de s, que busca establecer una única ecuación de cálculo, que no sea afectada por posibles errores humanos, al eliminar la asignación de valores de puntaje de riesgo que debe realizar la persona que ejecuta el cálculo, descrita en la Resolución 2115 de 2007, en donde existen puntajes de riesgo para las variables fisicoquímicas y microbiológicas si la variable excede valores límite.

El modelo de regresión logística es de gran importancia en la parte aplicada debido a que facilita la modelación de una variable de naturaleza cualitativa en términos de un conjunto que tiene dos categorías de carácter nominal, debido a su pertenencia a la familia exponencial, es de gran utilidad en áreas como la economía y la salud, pues en muchos casos se desea

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

conocer cómo cambian estas probabilidades con relación a características inherentes de los individuos. (Osorio, Ospina, Lenis, 2009). Con este modelo matemático el porcentaje de error entre el valor IRCA calculado utilizando el método de la Resolución No. 2115 de 2007 y el método de la función logística es igual a cero, encontrándose diferencias entre estos dos valores a partir de las treceava cifra decimal.

### 6. Conclusiones

El ACP permitió la identificación de las cuatro (4) variables que tienen mayor influencia o presentan un mayor impacto en el cálculo de IRCA, las cuales son: Hierro total, el cual muestra una alta correlación con otros parámetros fisicoquímicos del agua; el Cloro residual, que garantiza la ausencia de microorganismos patógenos en el agua potable; el Color Aparente, que no solo mejora el aspecto y palatabilidad del agua, sino que asegura que los microorganismos patógenos no se oculten entre el material particulado entorpeciendo el proceso de desinfección y los Sulfatos, los cuales representan al grupo de los parámetros estudiados que se encuentran disueltos en forma de iones.

El análisis de los datos históricos de los parámetros fisicoquímicos evidencia que los únicos que presentan un comportamiento definido son la Alcalinidad y los Cloruros, los cuales han aumentado progresivamente durante los años de estudio, y los Nitratos que han presentado una disminución constante a partir del año 2011. En tanto que La Turbiedad es el único parámetro que, en algunos meses, ha sobrepasado el valor máximo permisible (2UNT) reportado en la Resolución 2115 de 2007.

La variabilidad climática estacional incide en los parámetros de Turbiedad, Color Aparente, Aluminio, Sulfatos y en el mismo IRCA, aumentando sus concentraciones durante la época de lluvias, y en los parámetros de Cloro residual, pH y Alcalinidad, incrementando su concentración en los regímenes de sequía. Dureza, Nitratos y Cloruros no mostraron un comportamiento influenciado por la variabilidad climática estacional característica de la zona de estudio. Al determinar la relación de la variabilidad climática interanual, mediante el

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

método de Pearson, se encontró una alta correlación entre el índice Oceánico del Niño (ONI) con los parámetros: Nitratos (negativa), Alcalinidad, Cloruros, Dureza y pH.

El índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano (IRCA) en Bucaramanga, Floridablanca y Girón, propuesto en la resolución 2115 de 2007, metodológicamente involucra un gran componente de subjetividad, debido a que las personas que realizaron su planteamiento decidieron entre un gran número de variables físicas, químicas y microbiológicas cuales deberían ser tomadas consideración, eliminando otras variables que podrían afectar de forma más preponderante la calidad del agua y con esto el peligro asociado a su uso o consumo por parte de las personas y/o instalaciones domésticas. Adicionalmente a esto también se establecen valores máximos, mínimos o intervalos permitidos para que los valores medidos de las variables escogidas para el cálculo sean considerados como peligrosos y se les asigne un nivel o valor de riesgo.

El cambio del modelo calculo, de una metodología en donde el personal que realiza el cálculo escoge entre dos posibles valores, por un método matemático del tipo función logística, en donde se introducen los valores de las variables medidas a una serie de ecuaciones matemáticas y este reporta un único valor de IRCA, elimina la posibilidad de errores en la determinación de la calidad de agua para consumo humano.

### **7. Recomendaciones**

Realizar un estudio de caracterización fisicoquímica y microbiológica para determinar cuáles son los contaminantes que se presentan en la actualidad en las fuentes hídricas usadas en el proceso de potabilización en Santander, verificando sus concentraciones y posibles puntos de ingreso a la fuente hídrica.

Efectuar la búsqueda bibliográfica de las investigaciones y artículos más recientes respecto a las concentraciones mínimas y/o máximas permisibles de las sustancias contaminantes evaluadas en el IRCA a las cuales estas presentan efectos en la salud humana, con el fin de actualizar esta información y verificar sus niveles de riesgo asignados.

Estudiar el efecto de la variabilidad climática estacional e interanual en las concentraciones de las sustancias presentes en el agua antes y después del tratamiento de Potabilización, identificando la variación de las concentraciones y de esta forma plantear una optimización en el proceso de potabilización y transporte de agua en función de la Variabilidad Climática.

Reformular el IRCA teniendo en cuenta los nuevos contaminantes químicos presentes en las fuentes de agua susceptibles a Potabilización en la región y en Colombia y los efectos de la Variabilidad Climática Estacional e Interanual.

## 8. Referencias

- Abbasi, T., & Abbasi, S. (2012). *Water Quality Indices*. Elsevier.
- Alcaldía de Bucaramanga. (n.d.). Bucaramanga – Portal Web Alcaldia Bucaramanga. Retrieved June 10, 2017, from <http://www.bucaramanga.gov.co/el-mapa/>
- Alcaldía de Floridablanca. (n.d.). Información del Municipio. Retrieved June 10, 2017, from <http://www.floridablanca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-municipio.aspx>
- Alfaro, D., Giraldo, J., & Becerra, T. (2015). *Análisis del IRCA y su relación con las variables meteorológicas (precipitación y temperatura) y ubicación geográfica para el departamento de Nariño en los años 2012 - 2013*. Universidad de La Salle, Bogotá D.C. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Amb. (2016). Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P. Retrieved June 13, 2017, from <http://www.amb.com.co/frmInformacion.aspx?inf=36>
- AMB. (2014). *Usos, oferta y demanda de agua potable. Informe de Sustentabilidad*. Retrieved from <http://www.amb.com.co/Indicadores/Archivos/1gestion2012usos.pdf>
- Análisis de Dureza. (1995). Retrieved June 14, 2017, from <http://arturobola.tripod.com/dureza.htm>
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua coagulación y floculación. In *Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico*. (pp. 1–44). Retrieved from [http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154)
- Aplicada, G. de P. (n.d.). Análisis Multivariante con SPSS. Reducción de Datos: Análisis de Componentes Principales y Factorial. Retrieved June 11, 2017, from <https://web.ua.es/es/lpa/docencia/practicas-analisis-exploratorio-de-datos-con->

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

spss/practica-5-analisis-multivariante-con-spss-reduccion-de-datos-analisis-de-componentes-principales-y-factorial.html

Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D., & Ruíz, J. F. (2012). Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada al ciclo El Niño, La Niña- Oscilación del Sur (ENSO). *Ideam*, 33.

Beamonte, E. ., Bermúdez, J. ., Casino, A. ., & Veres, E. (2003). Un Indicador Global para la Calidad del Agua.

Blanco, F., Vásquez, G., Ramírez, J., & Navarrete, Á. (2003). Variación de algunos parámetros fisicoquímicos en el río Pescador, Valle del Cauca, durante el ciclo el niño 1997/1998-la niña 1998/1999. *Actual Biol*, 25(January 2003), 17.

Blanco, J. (2009). Características físico-químicas de las quebradas del parque nacional natural Gorgona, Pacífico colombiano. *Scielo*, 31(91), 123–140.

Burbano, S. L. R. (2009). *Estudio de la contaminación del agua por productos fabricados a base de PVC usando espectroscopía de absorción atómica y quimiometría*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Calvo-brenes, G. (2012). Nueva metodología para valorar la calidad de las aguas superficiales para su uso como clase 2 en Costa Rica New methodology for evaluating the surface waters quality to be used as Class 2 in Costa Rica. *Tecnología En Marcha*, 26, 9–19.

CDMB. (2006). Plan De Ordenamiento Y Manejo Ambiental Subcuenca Rio Surata, 43.

Charry, A. M., & Castellanos, A. (2016). *Evaluación de la calidad físico-química y biológica de la laguna de Ubaque para el diseño y actualización de las medidas de manejo ambiental*. Universidad Libre Colombia.

Cloracion1. (2005). Retrieved June 14, 2017, from

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

<http://www.elaguapotable.com/cloracion1.htm>

Cohen, J. (1977). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Academic Press.

Retrieved from <https://estadisticaorquestainstrumento.wordpress.com/2013/06/26/la-eta-cuadrada-y-la-eta-cuadrada-parcial/>

Defensoría del pueblo. (2009). *Evaluación del cumplimiento del derecho humano al agua*.

Estanques.eu. (n.d.). KH - Dureza de carbonatos - Documentos de Google. Retrieved June 22,

2017, from

<https://docs.google.com/document/d/13fr0Y9bARr2T7aqNz1AQiWt7e3DTjiSxRTnAUHwV3dU/edit>

Fernández, S. de la F. (2011). Análisis De Conglomerados. *Fac. Ciencias Económicas Y*

*Empresariales*, 55. Retrieved from

<http://www.fuenterrebollo.com/Economicas/ECONOMETRIA/SEGMENTACION/CONGLOMERADOS/conglomerados.pdf>

García, L. (2009). *Monitoreo de la calidad del agua en cursos de agua ríos y arroyos*.

García, M., Piñeros, A., Bernal, F., & Ardila, E. (2012). Variabilidad climática, cambio

climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 36.

Girón, A. de. (2005). Generalidades. In *Plan de Desarrollo de san Juan de Girón*. (pp. 81–98).

González, B. (2010). *Calidad del Agua Superficial en Latinoamérica*.

Jiménez, C. (2014). *Indicadores Climáticos. Una Manera para identificar la variabilidad*

*climática a escala global. Inapesca*.

López, F. moreno; R. (1991). *Determinación de cloro residual. Técnico INDUQUIM ACI*.

Retrieved from

<http://induquimgonveg.com/files/DeterminaciondeCloroResidualyCloroTotal.pdf>

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

- Medina, F., & Galván, M. (2007). Imputación de datos : teoría y práctica. Retrieved June 10, 2017, from <https://books.google.com.co/books?id=IP44JIV7h4cC&pg=PA13&dq=metodo+de+imputacion+de+datos&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiLptGom7TUAhUM7CYKHw-AFAQ6AEIJTAA#v=onepage&q&f=false>
- Ministerio de La Protección Social. (2007). Decreto No. 1575 de 2007. *Diario Oficial*, 2007(Mayo 9), 1–14. Retrieved from file:///C:/Users/Estacion6/Downloads/n16Dmps1575.htm
- Ministerio de Protección Social Ambiente Desarrollo y Vivienda. (2007). Resolución numero 2115. *Resolucion 2115*, 23. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Montealegre, E., & Pabón, J. (2002). Seguimiento, diagnóstico y predicción climática en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 5, 59–65.
- Montesdeoca, C. (n.d.). *Determinación del cloro residual y cloro total*.
- Oneisys Nuñez, Diana Porro, Isneri Talavera, Lázaro Bustio, Noslen Hernández, R. L. (n.d.). Nuevo sistema automatizado para el análisis de datos químicos y bioquímicos. In *VII Congreso Internacional de Informática en la Salud*.
- Orellana, J. A. (2005). Características del agua potable. *Ingeniería Sanitaria*, 1–7.
- Osorio, D., Ospina, J., & Lenis, D. (2009). Planteamiento del modelo logístico multinomial a través de la función canónica de enlace de la familia exponencial. *Heurística*, 16, 105–155.
- Otero, J., Herrarte, A., & Medina, E. (2005). *Análisis de la varianza (ANOVA)* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pabón, J. D., & Montealegre, J. E. (2000). La Variabilidad Climatica Interanual Asociada Al

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

- Ciclo El Niño-La Niña–Oscilacion Del Sur Y Su Efecto En El Patron Pluviometrico De Colombia. *Meteorología Colombiana*, 7–21. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/281605886\\_La\\_variabilidad\\_climtica\\_interanual\\_asociada\\_al\\_ciclo\\_El\\_Nio-La\\_Nia-Oscilacin\\_del\\_Sur\\_y\\_su\\_efecto\\_en\\_el\\_patrn\\_pluiviomtrico\\_de\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/281605886_La_variabilidad_climtica_interanual_asociada_al_ciclo_El_Nio-La_Nia-Oscilacin_del_Sur_y_su_efecto_en_el_patrn_pluiviomtrico_de_Colombia)
- Parámetros fisico-químicos: alcalinidad. (n.d.) (pp. 1–14).
- Pérez, J. (2010). *Caracterización de la calidad del agua en la planta de tratamiento de agua potable y en la red de distribución de la ciudad de Yopal*. Universidad Industrial de Santander.
- Pia, L. Análisis multivariado: Métodos componentes principales., Termodinamica § (2001). <https://doi.org/10:0-8400-5444-0>
- Rodríguez, Á., & Rodríguez, L. (2015). Análisis del índice de riesgo de calidad de agua para consumo humano IRCA y su relación con las variables meteorológicas y la ubicación geográfica para los departamentos de Arauca, Casanare y Vichada en el periodo 2012-2013. *reponame:Repositorio Institucional UNISALLE - RIUS*. Retrieved from <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/18011>
- Rodríguez, S., Gauna, L., & Martínez, G. (2012). Relación del nitrato sobre la contaminación bacteriana del agua,.
- Rosas, H. (2001). Cloruros. In *Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat* (pp. 2–3). Retrieved from <http://www.tesisred.net/bitstream/handle/10803/6978/04ComponentesAguas02.pdf?sequence=5>
- Sanabria, K. J. D., & Vásquez, N. M. F. (2015). *Análisis del IRCA y su relación con variables*

## EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

- meteorológicas (precipitación y temperatura) y ubicación geográfica para el departamento de Boyacá en los años 2012-2013.* Universidad de La Salle, Bogotá D.C.
- Sistema de Información Ambiental de Colombia. (n.d.). Fenomeno Niño y Niña - IDEAM. Retrieved June 7, 2017, from <http://www.ideam.gov.co/web/siac/ninoynina>
- Skoczenski, a M., & Norcia, a M. (2002). Capítulo 20 Análisis factorial : El procedimiento Análisis factorial. In *SPSS Manual* (Vol. 13, pp. 537–541). Retrieved from [http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list\\_uids=12430838](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=12430838)
- Statgraphics. (2006). Resumen Datos de Muestra : Datos de Entrada (pp. 1–29).
- The Environmental, & Protection Agency. (2001). Parameters of water quality. *Environmental Protection*, 133. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Tortajada, L. A. (2002). Soluciones Quimiométricas Para Optimizar El Análisis De Parámetros Químicos En Aguas, 1–327.
- V. El cuadro ambiental del fitoplancton. (n.d.). Retrieved June 24, 2017, from [http://www.cubaeduca.cu/medias/cienciatodos/Libros\\_1/ciencia2/35/htm/SEC\\_9.HTM](http://www.cubaeduca.cu/medias/cienciatodos/Libros_1/ciencia2/35/htm/SEC_9.HTM)
- Valenzuela, M. (2004). Dureza del Agua. In *Exploración de posibilidades para proponer un tren de tratamiento para remoción de dureza que logre la optimización técnica y económica del proceso* (pp. 575–588). Retrieved from [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leip/valenzuela\\_m\\_td/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/valenzuela_m_td/)
- Vergara Schmalbach, J. C., & Quesada Ibarguen, V. M. (n.d.). *Estadística básica con aplicaciones en MS Excel* ®.
- Xm filial de isa. (2014). Índice Océanico del Niño (ONI). Retrieved June 10, 2017, from <http://informesanuales.xm.com.co/2014/SitePages/operacion/2-8-Anex-Indice-oceanico->

# EVALUACIÓN QUIMIOMÉTRICA DEL IRCA

de-El-Niño-(ONI).aspx